

# **Comportamento Térmico e Energético de Unidades CANIFA e Propostas de Melhoria. Caso de Estudo: Edifício de Caserna**

**Carlos Alberto Gregório Pereira Bom**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

## **Engenharia Militar**

Orientadores

Professor Doutor Albano Luís Rebelo da Silva das Neves e Sousa

Professor Doutor António Heleno Domingues Moret Rodrigues

## **Júri**

Presidente: Professora Doutora Ana Paula Patrício Teixeira Ferreira Pinto França de  
Santana

Orientador: Professor Doutor António Heleno Domingues Moret Rodrigues

Vogal: Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Vogal: Tenente-Coronel de Engenharia Raul Fernando Rodrigues Cabral Gomes

**Outubro de 2014**







## **Agradecimentos**

Esta dissertação representa o término de um longo percurso académico de ensino superior. Um percurso destes não é possível ser realizado sozinho, pelo que gostaria de agradecer às pessoas que permitiram tal ser possível.

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador Professor Doutor Albano Luís Rebelo da Silva das Neves e Sousa e ao meu coorientador Professor Doutor António Heleno Domingues Moret Rodrigues, pela sua disponibilidade, orientação empenhada e séria no esclarecimento de dúvidas e recomendações para a realização do presente trabalho.

Em segundo lugar quero agradecer aos meus pais pelo papel que desempenharam em toda a minha educação e formação, tornando possível a conclusão desta etapa na minha vida, o que sem eles não teria sido possível.

Gostaria também de agradecer aos meus camaradas de curso da Academia Militar, principalmente ao João Cabrito, ao Rui Fonte-Boa e ao Miguel Gonçalves por todo o apoio que me deram ao longo destes anos.

Um agradecimento especial à minha namorada Lídia Sousa, pelo seu apoio, motivação e compreensão que foram sem dúvida alguma essenciais para a concretização deste objetivo.

Por fim gostaria de agradecer à Academia Militar pela formação que me foi prestada em todos os níveis, assim como à Direção de Infraestruturas do Exército e ao Regimento de Artilharia nº4 por toda a disponibilidade e colaboração prestadas para a realização do presente trabalho.



## Resumo

A preocupação crescente com a rentabilização energética, face à reserva limitada de combustíveis fósseis e à poluição atmosférica gerada pela utilização destes, torna premente que no sector imobiliário, um dos principais destinatários da produção energética mundial, sejam implementadas medidas que permitam a poupança de recursos e um uso mais eficiente da energia.

Os edifícios militares do tipo CANIFA, tendo sido construídos nos anos 50, encontram-se naturalmente desatualizados relativamente às exigências de conforto térmico e eficiência energética. Desta forma, considera-se importante um estudo que avalie do ponto de vista energético estes edifícios e proponha soluções de melhoria do seu desempenho.

A presente dissertação tem como objetivo descrever o desempenho energético destes edifícios militares e propor uma forma de melhorar o seu desempenho, utilizando como objeto de estudo um edifício de Caserna do Regimento de Artilharia nº4, para o qual foi feita uma proposta de reabilitação. Numa primeira fase efetuou-se uma análise de sensibilidade da qualidade do ar interior de forma a ser possível determinar a taxa de renovação de ar novo necessária para os quartos. Seguiu-se um estudo térmico com as condições atuais do edifício e, posteriormente, e com base num critério que combina o período de retorno do investimento com a taxa anual de poupança energética, determinou-se a espessura de isolamento a adotar para a reabilitação proposta em cada elemento construtivo.

Por último foi realizada uma análise global do edifício, tendo-se verificado que a reabilitação proposta conduz a melhorias significativas do desempenho energético do mesmo.

Palavras-chave: CANIFA, Desempenho Energético, Qualidade do Ar Interior, Reabilitação Energética, Período de Retorno





## **Abstract**

The growing concern about energy efficiency, given the limited reserve of fossil fuels and the high air pollution emissions, makes it imperative that in the real estate sector – one of the main recipients of global energy production – measures that allow a more efficient use of energy and resources be implemented.

The CANIFA type military buildings, built in the 50s, are of course outdated in what concerns to energy saving and thermal comfort, for this reason they will be analyzed in this thesis.

This study aims at describing the energy performance of these military buildings and propose a way to improve it. As subject of study a Barracks from Artillery Regiment no. 4 will be used, for which a proposal of rehabilitation will be made. First a sensitivity study about the indoor air quality was conducted in order to determine the rate of fresh air renewal required in the rooms. After that a thermal study with the current conditions of the building was done. Later, and on the basis of a criterion that combines the payback period with the annual rate of energy saving, it was determined the thickness of insulation to adopt for the rehabilitation proposal in each constructive element.

Finally a global analysis was carried out and it was found that the rehabilitation proposal leads to significant improvements in the energy performance of the building.

Keywords: CANIFA, Energy Performance, Indoor Air Quality, Energy Rehabilitation, Payback Period



# Índice

Agradecimentos.....	I
Resumo .....	III
Abstract.....	V
Índice .....	VII
Índice de Figuras .....	IX
Índice de Tabelas .....	XI
Abreviaturas .....	XIII
Simbologia .....	XV
Capítulo I .....	1
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação e Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura do Trabalho.....	3
Capítulo II .....	5
2. Reabilitação Térmica/Energética de Edifícios.....	5
2.1. Energias Renováveis vs Energias Convencionais .....	5
2.2. Reabilitação energética e qualidade do ar de edifícios em Portugal .....	6
2.3. Legislação.....	7
Capítulo III .....	9
3. Caracterização do Edifício Tipo CANIFA .....	9
3.1. Origem do Conceito.....	9
3.2. Organização Geral das Unidades CANIFA .....	9
3.3. Regimento de Artilharia nº4.....	12
3.4. Localização do Regimento de Artilharia nº4 .....	13
3.5. Localização do Edifício de Caserna .....	13
3.6. Orientação do Edifício de Caserna .....	14
3.7. Caracterização do Edifício de Caserna.....	15
3.8. Caracterização dos Quartos.....	18
3.9. Caracterização dos Elementos Construtivos .....	19
Capítulo IV .....	23
4. Caso de Estudo .....	23

4.1.	Método de Análise .....	23
4.2.	Modelação do Edifício de Caserna .....	24
4.2.1.	Geometria do Edifício .....	24
4.2.2.	Zonas Térmicas – <i>Thermal Zones</i> .....	25
4.2.3.	Parâmetros de Simulação – <i>Simulation Parameters</i> .....	27
4.2.4.	Localização e Clima – Location and Climate .....	28
4.2.5.	Horários – <i>Schedules</i> .....	29
4.2.6.	Elementos Construtivos – <i>Surface Construction Elements</i> .....	30
4.2.7.	Dispositivos de Sombreamento – <i>Window Shading Control</i> .....	32
4.2.8.	Ganho Internos – <i>Internal Gains</i> .....	32
4.3.	Estudo da Qualidade do Ar .....	34
4.3.1.	Produção de Dióxido de Carbono .....	34
4.3.2.	Concentração de Dióxido de Carbono .....	35
4.4.	Estudo Térmico .....	41
4.4.1.	Renovações de Ar – Cobertura .....	42
4.4.2.	Termostato – <i>Thermostat</i> .....	43
4.4.3.	Análise dos Resultados para a Solução Construtiva Original.....	45
4.4.4.	Soluções de Reabilitação Térmica/Energética.....	53
4.4.5.	Seleção das Soluções de Reabilitação Térmica .....	57
4.4.6.	Solução Ótima .....	67
Capítulo V	.....	73
5.	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros .....	73
Referências Bibliográficas	.....	77

## Índice de Figuras

Figura 1 - Relação percentual das Fontes de Energia a nível mundial (2010) [2] .....	5
Figura 2 - Repartição percentual do consumo energético pelos diferentes sectores na EU [3] .....	6
Figura 3 - Número de edifícios por época de construção [4] .....	7
Figura 4 - Núcleos Funcionais de uma Unidade CANIFA [5] .....	10
Figura 5 - Posição Relativa dos Núcleos Funcionais [5] .....	10
Figura 6 - Fotografia aérea do RA 4 Leiria .....	12
Figura 7 - Concelho de Leiria .....	13
Figura 8 - Localização do Edifício de Caserna.....	13
Figura 9 - Orientação do Edifício de caserna em relação ao Norte .....	14
Figura 10 - Planta do 1º Piso.....	16
Figura 11 - Escadaria de Acesso ao Segundo Piso .....	16
Figura 12 - Alçado Principal.....	17
Figura 13 - Alçado Posterior .....	17
Figura 14 - Alçado Direito e Alçado Esquerdo .....	18
Figura 15 - Disposição de um Quarto.....	18
Figura 16 - Abertura na Parede Exterior para ventilação .....	20
Figura 17 - Pormenor da abertura em que é visível a pedra natural.....	20
Figura 18 - Pormenor da Caixilharia e do Envidraçado.....	20
Figura 19 - Acessos ao 1º e 2º Pisos .....	21
Figura 20- Planta com as simplificações geométricas assinaladas .....	25
Figura 21 - Geometria final inserida no <i>Google Sketchup</i> ® .....	25
Figura 22 - Zonas Térmicas do 1º Piso .....	26
Figura 23 - Zonas Térmicas do 2º Piso .....	26
Figura 24 - Sombreamento num quarto .....	32
Figura 25 - Iluminação artificial de um quarto .....	33
Figura 26 - Concentrações de CO <sub>2</sub> para o dia 17 de Janeiro .....	37
Figura 27 - Variação da Concentração de CO <sub>2</sub> em função das Renovações de Ar e valores estipulados pelos regulamentos.....	38
Figura 28 - Temperaturas ao longo de dois dias na Estação de Aquecimento .....	42
Figura 29 - Temperaturas ao longo de dois dias na Estação de Arrefecimento .....	43
Figura 30 - Distribuição das Temperaturas médias diárias para o mês de Janeiro .....	47
Figura 31 - Distribuição de Temperaturas médias diárias para o mês de Janeiro com sistema de climatização .....	47
Figura 32 - Necessidades Energéticas para o mês de Janeiro.....	48
Figura 33 - Distribuição das Temperaturas médias diárias para o mês de Julho .....	48

Figura 34 - Distribuição de Temperaturas médias diárias para o mês de Julho com sistema de climatização .....	49
Figura 35 - Necessidades Energéticas para o mês de Julho .....	49
Figura 36 - Distribuição das Temperaturas médias diárias para o mês de Janeiro .....	50
Figura 37 - Distribuição de Temperaturas médias diárias para o mês de Janeiro com sistema de climatização .....	51
Figura 38 - Necessidades Energéticas para o mês de Janeiro .....	51
Figura 39 - Distribuição das Temperaturas médias diárias para o mês de Julho .....	52
Figura 40 - Distribuição de Temperaturas médias afetadas pelo sistema de climatização .....	52
Figura 41 - Necessidades Energéticas para o mês de Julho .....	53
Figura 42 - Exemplo de uma solução para a cobertura em causa [13].....	54
Figura 43 - Várias camadas constituintes do sistema ETICS [13] .....	55
Figura 44 - Esquema de instalação do isolamento na laje térrea [15] .....	56
Figura 45 - Custos em função da Espessura – EPS .....	60
Figura 46 - Períodos de Retorno e Relação Período/Poupança – EPS.....	62
Figura 47 - Custos em função da Espessura – Lã-de-Rocha .....	63
Figura 48 - Períodos de Retorno e Relação Período/Poupança – Lã-de-Rocha.....	64
Figura 49 - Custos em função da Espessura – XPS .....	65
Figura 50 - Períodos de Retorno e Relação Período/Poupança – XPS.....	66

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Lista das várias Unidades e o estado em que estas se encontravam (adaptado de A Engenharia Militar Portuguesa [6]) .....	11
Tabela 2 - Critérios para Zona Climática de Aquecimento .....	14
Tabela 3 - Critérios para Zona Climática de Arrefecimento .....	14
Tabela 4 - Determinação da Zona Climática de Aquecimento .....	15
Tabela 5 - Determinação da zona Climática de Arrefecimento .....	15
Tabela 6 - Constituição dos Elementos Construtivos .....	19
Tabela 7 - Dados relativos à localização do Edifício de Caserna .....	28
Tabela 8 - Temperatura média do solo ao longo dos diferentes meses .....	29
Tabela 9 - Horários Gerais à Simulação .....	30
Tabela 10 - Elementos Construtivos e Materiais Constituintes .....	31
Tabela 11 - Áreas de cada Elemento Construtivos nas várias Zonas Térmicas .....	31
Tabela 12 - Atividades com respetivos horários e níveis de metabolismo .....	33
Tabela 13 - Emissões de CO <sub>2</sub> por Pessoa e Atividade [8] .....	34
Tabela 14 - Taxa metabólica para cada atividade .....	35
Tabela 15 - Concentrações máximas de referência de poluentes no interior dos edifícios existentes [9] .....	35
Tabela 16 - Limiar de proteção e margem de tolerância para os poluentes físico-químicos [10].	36
Tabela 17 - Renovações por Hora adotadas para o estudo .....	37
Tabela 18 - Caudais mínimos de ar novo [9] .....	38
Tabela 19 - Caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devido à ocupação [10] .....	39
Tabela 20 - Caudal de ar novo para 1,0 R <sub>ph</sub> .....	39
Tabela 21 - Classes de exposição ao vento das fachadas do edifício [11] .....	40
Tabela 22 - Valores convencionais de R <sub>ph</sub> (em h <sup>-1</sup> ) para edifícios de habitação [11] .....	41
Tabela 23 - Horário de funcionamento e R <sub>ph</sub> fornecidas pelo sistema de ventilação mecânica ...	41
Tabela 24 - Horário estipulado para a Cobertura .....	43
Tabela 25 - Horário para a Estação de Aquecimento .....	44
Tabela 26 - Horário para a Estação de Arrefecimento .....	44
Tabela 27 - Condutâncias Térmicas e Coeficientes de Transmissão Térmica .....	45
Tabela 28 - Valores para as Resistências Térmicas Superficiais .....	46
Tabela 29 - Coeficientes de transmissão térmica máximo admissível, U <sub>max</sub> , para a envolvente opaca exterior de edifícios de comércio e serviços [12], em W/m <sup>2</sup> .°C .....	46
Tabela 30 - Necessidades Energéticas (kWh/Ano) — Estação de Aquecimento .....	53
Tabela 31 - Necessidades Energéticas (kWh/Ano) — Estação de Arrefecimento .....	53
Tabela 32 - Características do EPS introduzidas na modelação .....	54
Tabela 33 - Características da Lã-de-Rocha introduzidas na modelação .....	56

Tabela 34 - Características do XPS introduzidas na modelação .....	57
Tabela 35 - Espessuras adotadas para estudo – EPS.....	60
Tabela 36 - Custos para as várias espessuras – EPS .....	61
Tabela 37 - Necessidades Energéticas e Poupanças – EPS .....	61
Tabela 38 - Espessuras adotadas para o estudo – Lã-de-Rocha.....	62
Tabela 39 - Custos para as várias espessuras – Lã-de-Rocha .....	63
Tabela 40 - Necessidades Energéticas e Poupanças – Lã-de-Rocha.....	64
Tabela 41 - Espessuras adotadas para o estudo – XPS .....	65
Tabela 42 - Custos para as várias espessuras – XPS .....	65
Tabela 43 - Necessidades Energéticas e Poupanças – XPS .....	66
Tabela 44 - Combinação de Espessuras para a Solução Ótima .....	67
Tabela 45 - Necessidades Energéticas após reabilitação (kWh/Ano) — Estação de Aquecimento .....	67
Tabela 46 - Necessidades Energéticas após reabilitação (kWh/Ano) — Estação de Arrefecimento .....	67
Tabela 47 - Condutâncias Térmicas e Coeficientes de Transmissão Térmica .....	68
Tabela 48 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência, $U_{ref}$ , de elementos opacos e de vãos envidraçados para edifícios de comércio e serviços [12], em $W/m^2 \cdot ^\circ C$ .....	69
Tabela 49 - Necessidades energéticas de aquecimento, arrefecimento e totais (kWh/Ano) para situação original.....	70
Tabela 50 - Necessidades energéticas de aquecimento, arrefecimento e Totais (kWh/ano) para situação reabilitada.....	70



## Abreviaturas

BA – Base Aérea

BatMetr – Batalhão de Metralhadoras

BCaç – Batalhão de Caçadores

BIIInf – Batalhão Independente de Infantaria

BInf – Batalhão de Infantaria

CANIE – Comissão Administrativa para as Novas Infraestruturas do Exército

CANIFA – Comissão Administrativa para as Novas Infraestruturas das Forças Armadas

EPA – Escola Prática de Artilharia

EPC – Escola Prática de Cavalaria

EPS – Poliestireno Expandido

ETICS – *External Thermal Insulation Composite Systems*

HMP – Hospital militar Principal

HMR – Hospital Militar Regional

QG – Quartel-General

RA – Regimento de Artilharia

RAP – Regimento de Artilharia Pesada

RC – Regimento de Cavalaria

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RE – Regimento de Engenharia

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

RECS – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

RI – Regimento de Infantaria

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

SCE – Sistema de Certificação Energética

XPS – Poliestireno Extrudido



## Simbologia

$C$  – Calor Específico [J/kg.K]

$CO_2$  – Dióxido de Carbono

$e$  – Espessura [m]

$E_{TOTAL}$  – Energia Total Primária [tep]

$F_{pu,aquec}$  – Fator de Conversão entre Energia Final de Aquecimento e Energia Primária  
[kWh<sub>EP</sub>/kWh]

$F_{pu,arref}$  – Fator de Conversão entre Energia Final de Arrefecimento e Energia Primária  
[kWh<sub>EP</sub>/kWh]

$K_p$  – Condutância Térmica [W/m<sup>2</sup>.°C]

$met$  – Equivalente Metabólico [W/m<sup>2</sup>]

$N_{aquec}$  – Necessidades Energéticas de Aquecimento [kWh/Ano]

$N_{arref}$  – Necessidades Energéticas de Arrefecimento [kWh/Ano]

$U$  – Coeficiente de Transmissão Térmica [W/m<sup>2</sup>. °C]

$U_{max}$  – Coeficiente de Transmissão Térmica Admissível [W/m<sup>2</sup>. °C]

$U_{ref}$  – Coeficiente de Transmissão Térmica de Referência [W/m<sup>2</sup>. °C]

$\eta_{aquec}$  – Rendimento do Equipamento para fornecimento de energia na Estação de Aquecimento

$\eta_{arref}$  – Rendimento do Equipamento para fornecimento de energia na Estação de Arrefecimento

$\lambda$  – Condutividade Térmica [W/m. °C]

$\rho$  – Densidade [Kg/m<sup>3</sup>]



# Capítulo I

## 1. Introdução

### 1.1. Motivação e Enquadramento

As alterações climáticas globais que se têm vindo a sentir atualmente, devem-se em grande parte ao aumento da libertação para atmosfera de gases com efeito de estufa, como o CO<sub>2</sub> (Dióxido de Carbono), provenientes da utilização excessiva de combustíveis fósseis, como o carvão, o petróleo e o gás natural, que são as principais fontes de energia utilizadas no planeta. Para além do impacto ambiental, a escassez destas fontes de energia não renováveis representa também uma preocupação crescente nas sociedades atuais, como o demonstram as inúmeras iniciativas governamentais por uma maior racionalização e eficiência na utilização dos recursos energéticos. Só com este tipo de iniciativas e apelos à consciência coletiva para os perigos de uma procura incontrollada destes recursos, se poderá reduzir de forma efetiva o consumo de energia não renovável, sobretudo nos grandes centros urbanos, e caminhar-se no sentido da preservação ambiental e de um desenvolvimento tecnológico e social mais sustentável.

Para além das atividades que estão relacionadas com a indústria, que é o sector que apresenta o maior consumo energético, existem variadas atividades que são realizadas nos edifícios e que se encontram igualmente dependentes deste tipo de recursos. Neste contexto, o sector imobiliário é um domínio em que a rentabilização energética é essencial, pois independentemente da função a que se destinam, seja ela relacionada com o comércio, os serviços ou meramente habitação, todos os edifícios desempenham um papel fundamental no quotidiano de uma sociedade, e a essa função está ligado um consumo significativo da energia que é produzida. Devido ao elevado consumo energético que lhes está associado, é natural que os edifícios sejam alvos preferenciais de intervenções de reabilitação com vista a uma redução desses consumos e, no limite, à produção da sua própria energia, através de instalações apropriadas, convertendo-os deste modo em unidades edificadas auto-sustentáveis em termos energéticos. Este tipo de intervenções, que conduzem a uma redução do consumo de energia convencional, concorre para a diminuição da procura de combustíveis fósseis e da produção de CO<sub>2</sub>, promovendo a qualidade ambiental e um desenvolvimento urbano mais sustentável.

Portugal não é exceção ao nível dos consumos energéticos. Segundo os dados mais recentes de 2014 da Base de Dados de Portugal Contemporâneo [1], apesar do consumo de energia primária ter vindo a diminuir de ano para ano, desde 2005, os valores em que se encontra ainda são elevados.

Acompanhando esta preocupação, e com o objetivo de melhorar o desempenho energético dos edifícios, a União Europeia elaborou a Diretiva 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002. Esta diretiva teve transposição na legislação Portuguesa através do Decreto-Lei nº78/2006 de 4 de Abril, relativo ao Sistema Nacional de Certificação Energética e da

Qualidade do Ar Interior nos Edifícios, do Decreto-Lei nº79/2006, relativo ao Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) e por último do Decreto-Lei nº80/2006, relativo ao Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Em 2010, a Diretiva 2002/91/CE foi revogada e substituída pela Diretiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010. Esta diretiva, para além de apontar para a necessidade de aumentar os níveis de eficiência energética dos edifícios, introduziu também o conceito inovador de edifícios com necessidades quase nulas de energia, estabelecendo prazos para a sua implementação. No que toca à transposição para a legislação Portuguesa, esta processou-se através do Decreto-Lei nº118/2013 de 20 de Agosto de 2013, que veio aprovar o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

Todas as medidas no sentido de melhorar a eficiência energética dos edifícios deverão ser aplicadas aquando da construção dos edifícios de raiz. No entanto, não podem ser excluídos das preocupações com os gastos energéticos os edifícios já existentes antes da aprovação das diretivas mencionadas, e que possuem naturalmente uma eficiência energética baixa. Também estes edifícios devem ser adaptados, a nível da sua construção e instalações, para se ajustarem às exigências da legislação em vigor. Um exemplo destes edifícios antigos, pouco eficientes do ponto de vista energético, são os edifícios militares tipo CANIFA (Comissão Administrativa para as Novas Infraestruturas das Forças Armadas), construídos nas décadas de 1950 e 1960. Estes edifícios, apesar de terem vindo a sofrer algumas remodelações pontuais ao longo do tempo, encontram-se ainda muito longe da rentabilidade energética desejável e daí justificarem a necessidade de uma reabilitação mais profunda e muito bem estruturada. Assim sendo, um estudo a nível do comportamento térmico e das necessidades energéticas, assim como um estudo de sensibilidade sobre a qualidade do ar interior, é de enorme interesse por forma a explorar soluções que possam colocar os edifícios tipo CANIFA dentro de parâmetros aceitáveis nos termos da legislação em vigor, permitindo em última instância uma diminuição dos custos inerentes às suas necessidades energéticas e à poupança de recursos naturais não renováveis.

## **1.2. Objetivos**

Nesta dissertação de mestrado o objetivo principal é avaliar o desempenho térmico de um edifício de caserna pertencente a uma unidade militar do tipo CANIFA, e desta forma propor melhorias relativamente ao tipo e nível de isolamento térmico a adotar para uma futura reabilitação. Esta análise será desenvolvida tendo por base os custos de investimento associados à intervenção de reabilitação e os custos de exploração associados às necessidades energéticas para assegurar as exigências de conforto térmico. Também é objetivo desta dissertação a realização de um estudo de sensibilidade centrado na qualidade do ar interior de forma a verificar a sua conformidade face à legislação em vigor e apresentar propostas de melhoria relativamente a este parâmetro. O edifício de

caserna em causa nesta dissertação faz parte do Regimento de Artilharia nº4 em Leiria, no qual o conceito de unidade do tipo CANIFA está representado de forma exemplar.

Para a realização deste estudo será usado o programa *EnergyPlus®*, que é um programa informático muito utilizado para a realização de estudos energéticos e que permite simular os edifícios em regime dinâmico, utilizando para isso ficheiros apropriados contendo os dados climáticos do local da sua implantação. Para além de balanços energéticos, o programa efetua também balanços de massa, permitindo estimar a evolução das concentrações de massa dos poluentes produzidos no interior dos edifícios, capacidade que foi explorada neste trabalho para realizar o estudo sobre a qualidade do ar no interior do edifício de caserna. O poluente considerado foi o CO<sub>2</sub>, que resulta da presença humana nos quartos de dormir, e que pode atingir níveis inaceitáveis se não estiver prevista uma ventilação suficiente desses espaços.

O estudo térmico será realizado, numa primeira fase, com as características atuais do edifício de forma a recolher informação relativa às suas deficiências a nível de comportamento térmico e, consequentemente, energético. Numa segunda fase serão realizadas várias análises em que, para o tipo de isolamento térmico selecionado para cada elemento construtivo, são feitas variar as correspondentes espessuras de forma a obter a variação das necessidades energéticas e dos custos monetários, quer de investimento quer de exploração, que ficam associados a cada espessura. Desta forma será possível, através de uma metodologia que combina o período de retorno do investimento com a poupança energética anual, determinar a solução de reabilitação térmica mais rentável, segundo esta perspetiva, para o edifício.

Por fim, com a determinação da solução considerada ótima, será realizada uma análise com esta solução de forma a poder compará-la com as condições atuais do edifício e com os parâmetros de qualidade térmica regulamentares.

### **1.3. Estrutura do Trabalho**

Esta dissertação é constituída por 5 capítulos. No primeiro capítulo efetua-se um enquadramento do tema, de forma a evidenciar a importância do mesmo, e definem-se os objetivos do estudo e os métodos utilizados para os alcançar.

O capítulo 2 inicia-se com uma introdução à reabilitação térmica e energética dos edifícios, dando ênfase à sua relevância tendo em conta o contexto atual, e enquadrando-a com as diretivas europeias e legislação interna, relacionadas com a eficiência energética dos edifícios, para um melhor entendimento da matéria em causa.

O Capítulo 3 tem como finalidade explicar todo o processo de criação dos edifícios do tipo CANIFA, desde a origem do conceito até à organização espacial destas unidades, realçando também os aspetos relativos à sua construção, dando uma maior ênfase ao edifício que será objeto de estudo nesta dissertação.

No capítulo 4 é feita a análise do caso de estudo, a qual pode subdividir-se em quatro fases. Na primeira fase é explicada a metodologia utilizada para a realização do estudo. A segunda fase é relativa à modelação realizada do caso de estudo tendo em vista a sua introdução no *EnergyPlus*<sup>®</sup>. A fase seguinte, a terceira, corresponde ao estudo de sensibilidade sobre a qualidade do ar, onde foi determinada a taxa de renovação de ar novo necessária para respeitar os valores vigentes nos regulamentos. Por fim, a quarta fase é relativa ao estudo térmico, que começa com uma análise do caso de estudo nas suas condições atuais, envolvendo a simulação com o *EnergyPlus*<sup>®</sup> e também a comparação dos parâmetros térmicos da construção com os respetivos valores regulamentares. Uma vez assentes os elementos construtivos a isolar termicamente, e definidos os tipos de materiais isolantes a aplicar, o estudo prossegue com a determinação das necessidades energéticas em função da espessura do material isolante e estabelecimento da estrutura de custos (investimento e exploração) associada a cada espessura. A partir destes custos, e através de um método apropriado, que combina o período de retorno com a poupança energética anual, foi identificada a espessura ótima para cada elemento construtivo. A finalizar este capítulo é realizada uma análise do caso de estudo com a solução de reabilitação considerada ótima, à luz do método utilizado, e comparados os resultados com os da solução original e com os parâmetros térmicos regulamentares relevantes.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as principais conclusões da dissertação, assim como alguns estudos futuros que podem dar sequência ao trabalho desenvolvido.

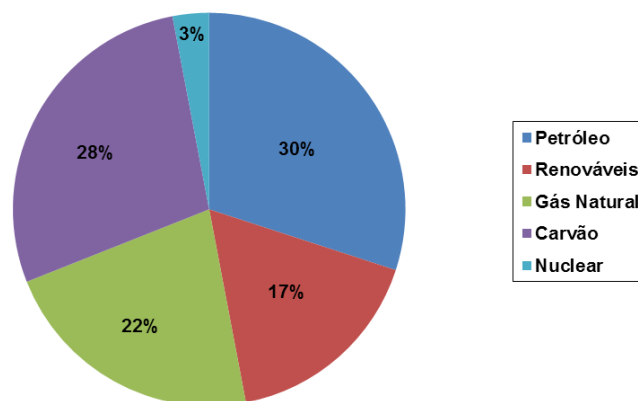


## Capítulo II

### 2. Reabilitação Térmica/Energética de Edifícios

#### 2.1. Energias Renováveis vs Energias Convencionais

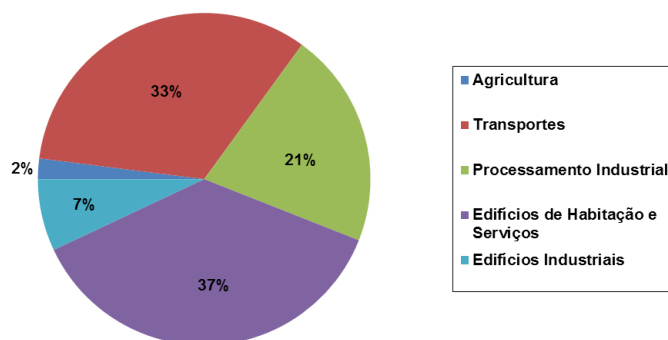
O mundo atual encontra-se de uma forma geral completamente dependente da energia. Este recurso é o motor da economia de qualquer sociedade moderna e está presente em todos os sectores produtivos. Os edifícios, sejam de cariz habitacional ou de comércio e serviços, estão altamente dependentes de energia na sua utilização quotidiana. A energia pode ser produzida de diversas formas, nomeadamente recorrendo a fontes renováveis ou a fontes convencionais. As fontes renováveis permitem uma utilização da energia sustentável, uma vez que não assentam em recursos esgotáveis e a sua produção não leva à libertação de excedentes poluentes. Existem diversos tipos de energias renováveis: energia eólica, energia solar, energia hídrica, energia das ondas e marés, energia geotérmica, etc. As fontes convencionais de energia, por outro lado, assentam em recursos finitos, e a sua produção gera emissão de elementos poluentes. Atualmente, a preocupação com a utilização de energias renováveis é crescente, no entanto existe ainda uma elevada dependência de fontes de energia não renováveis, como é visível na Figura 1.



**Figura 1 - Relação percentual das Fontes de Energia a nível mundial (2010) [2]**

Efetivamente, a nível mundial a dependência de fontes de energias não renováveis é ainda enorme. Esta dependência elevada das energias não renováveis baseadas em recursos finitos, conjugada com o facto da produção de energia com recurso a fontes não renováveis gerar emissão de um grande volume de poluentes, originou uma alteração das prioridades mundiais, que se passaram a centrar na necessidade de redução dos gastos energéticos de forma a assegurar um futuro mais sustentável.

Na generalidade das cidades o consumo de energia é muito significativo, o qual é proveniente de variados sectores. Na Figura 2 é possível observar como é feita a repartição do consumo de energia pelos diferentes sectores na União Europeia.



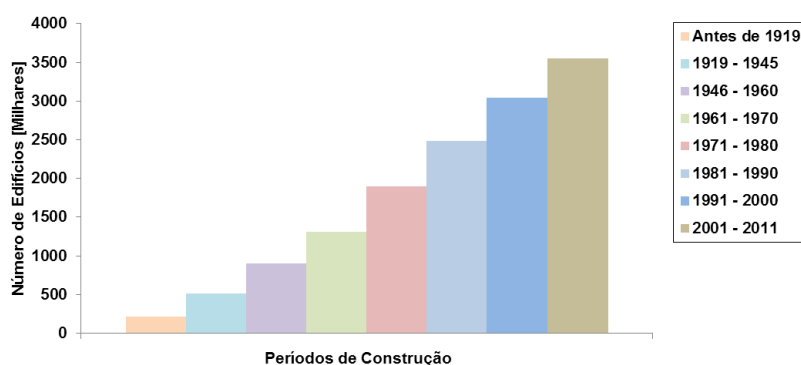
**Figura 2 - Repartição percentual do consumo energético pelos diferentes sectores na EU [3]**

Verifica-se que os edifícios representam uma grande fatia dos gastos energéticos, pelo que deverão ser alvos preferenciais de intervenção no sentido de reduzir os consumos e, consequentemente, a geração de emissões poluentes para a atmosfera.

## **2.2. Reabilitação energética e qualidade do ar de edifícios em Portugal**

Em Portugal, à semelhança da União Europeia e do resto do mundo, a necessidade de reduzir o consumo energético é também uma realidade. Assegurar as exigências de conforto térmico com maior eficiência energética é um desígnio que está perfeitamente estabelecido nas sociedades desenvolvidas e consagrado em legislação própria dos respetivos países. Às exigências de conforto térmico, que atualmente estão refletidas na generalidade dos regulamentos da construção, juntam-se também as exigências de qualidade do ar interior, que são também muito importantes para a saúde e bem estar dos ocupantes dos edifícios. De facto, a degradação da qualidade do ar, com reflexos negativos para os ocupantes, pode ocorrer nos edifícios em consequência da emissão de substâncias poluentes que podem ocorrer no seu interior, designadamente com origem na presença humana e nos materiais de acabamento. Para atender às exigências de qualidade do ar, também existe atualmente regulamentação que estipula valores máximos para a concentração dos principais poluentes que podem estar presentes no interior dos edifícios.

Muitos dos edifícios atualmente em Portugal foram construídos há algumas décadas atrás, em alturas em que a preocupação com o conforto térmico, desempenho energético e qualidade do ar interior dos edifícios eram muito poucas ou inexistentes. Na Figura 3 pode-se observar o número de edifícios em função da época de construção.



**Figura 3 - Número de edifícios por época de construção [4]**

É visível que grande parte dos edifícios portugueses foram construídos em épocas muito anteriores à atual, razão pela qual se encontram fora do paradigma vigente de conforto térmico e desempenho energético. Tendo em conta este facto, torna-se notório que estes edifícios devem necessitar de uma profunda reabilitação de forma a adequá-los aos níveis de exigência atuais. Independentemente da necessidade de reabilitação energética, muitos destes edifícios já se encontram em acentuado estado de degradação por motivo do desgaste dos seus materiais com o tempo, pelo que tanto a nível estrutural como da construção, também carecem de intervenções de reabilitação específicas. Aliar a reabilitação estrutural e construtiva destes edifícios à sua reabilitação energética é certamente a ação estratégica mais adequada pois envolverá menores custos do que as intervenções de reabilitação realizadas separadamente.

Entre os edifícios de serviços que necessitam de reabilitação energética, destacam-se também os edifícios militares. Os edifícios militares, nomeadamente do tipo CANIFA, foram maioritariamente construídos na década de 50, estando por essa razão também bastantes desenquadrados com as preocupações de desempenho energético e conforto térmico atuais. Nesta dissertação pretende-se efetuar a análise das necessidades energéticas de um edifício CANIFA do tipo Caserna, com o objetivo de melhorar o seu desempenho energético e qualidade do ar interior. O edifício estudado neste trabalho foi um edifício de caserna do Regimento de Artilharia nº4, o qual é representativo de muitos outros edifícios de caserna em muitas unidades militares espalhadas por Portugal.

## 2.3. Legislação

De forma a tornar a ocupação humana mais sustentável, a tendência de utilização excessiva de recursos escassos e de emissão de poluentes para atmosfera deve ser contrariada. Com este propósito as exigências de poupança energética têm vindo a aumentar a nível global. Estas exigências abrangem também o sector dos edifícios. Neste sector estas exigências têm sido explanadas através de legislação própria, tendo a Diretiva Europeia 2002/91/CE sido o primeiro ato

legislativo da União Europeia que estabelece princípios de ação a adotar pelos Estados-Membros no que respeita à redução dos consumos energéticos em edifícios e emissão de gases de efeito de estufa. Esta Diretiva foi transposta para a legislação portuguesa através dos seguintes Decretos-Lei: Decreto-Lei nº78/2006 de 4 de Abril - Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE); Decreto-Lei nº79/2006 de 4 de Abril - Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização em Edifícios (RSECE); Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de Abril - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Esta legislação visou aumentar as exigências de isolamento térmico e eficiência das instalações com o objetivo de reduzir a energia consumida com o conforto térmico dos ocupantes dos edifícios.

Dado o agravamento da escassez de recursos e da necessidade de uma maior racionalização da energia, foi publicada a 19 de Maio de 2010 a Diretiva Europeia nº 2010/31/EU, que veio introduzir alterações à diretiva anterior que promovem a melhoria do desempenho energético dos edifícios. Esta Diretiva Europeia foi transposta para a legislação portuguesa através do Decreto-Lei nº118/2013 de 20 de Agosto, que aprova o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, e assenta no cumprimento do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). Esta nova regulamentação veio portanto substituir os anteriores SCE, RSECE e o RCCTE.

O objetivo do presente trabalho não é efetuar uma análise assente na regulamentação, sobretudo nos seus métodos de cálculo, mas sim utilizar esta regulamentação como linha orientadora para avaliar o nível de adequação das soluções de reabilitação propostas no que toca à sua qualidade térmica. Quanto à determinação das necessidades energéticas, optou-se neste trabalho pela utilização de um método dinâmico, baseado nos algoritmos de cálculo do programa *EnergyPlus®*, uma vez que este tipo de métodos conduzem a resultados mais próximos da realidade que os métodos quase-estacionários em que se baseiam as regulamentações térmicas.

## **Capítulo III**

### **3. Caracterização do Edifício Tipo CANIFA**

#### **3.1. Origem do Conceito**

Nos finais dos anos 40, mais precisamente em 1947, surge um plano de reconstrução económica europeia para reagir à devastação causada pela 2ª Grande Guerra. Este plano, designado por Plano Marshall e proposto pelos Estados Unidos da América, iria financiar os vários programas económicos de recuperação de cada país. Portugal não foi exceção e começa a receber a ajuda económica no segundo ano de aplicação deste plano (1949/50).

É também nesta altura que Portugal investe numa política de modernização do Estado. Na sequência desta política, as Forças Armadas são afetadas, tanto a nível de infraestruturas como de equipamento.

Ao nível das Infraestruturas, no Ministério das Obras Públicas e Comunicações é então criada a Comissão Administrativa para as Novas Infraestruturas das Forças Armadas (CANIFA) e, sob a alçada desta, a Comissão Administrativa para as Novas Infraestruturas do Exército (CANIE). Foi ainda durante os anos 40 que estas comissões projetaram e conceberam vários quartéis e outras instalações de âmbito militar. Estas eram caracterizadas pelo seu modo de implantação e características arquitetónicas, que ofereciam boas condições quer a nível estrutural como de comodidade e bem-estar.

#### **3.2. Organização Geral das Unidades CANIFA**

As Unidades que viriam a ser executadas sob a tutela da CANIFA tinham outra característica muito relevante, que era a sua organização espacial. Cada unidade integra vários edifícios com diferentes funções, podendo um edifício ter mais do que uma função. Um aspeto a realçar é a localização relativa entre os vários edifícios, dependendo da sua funcionalidade.

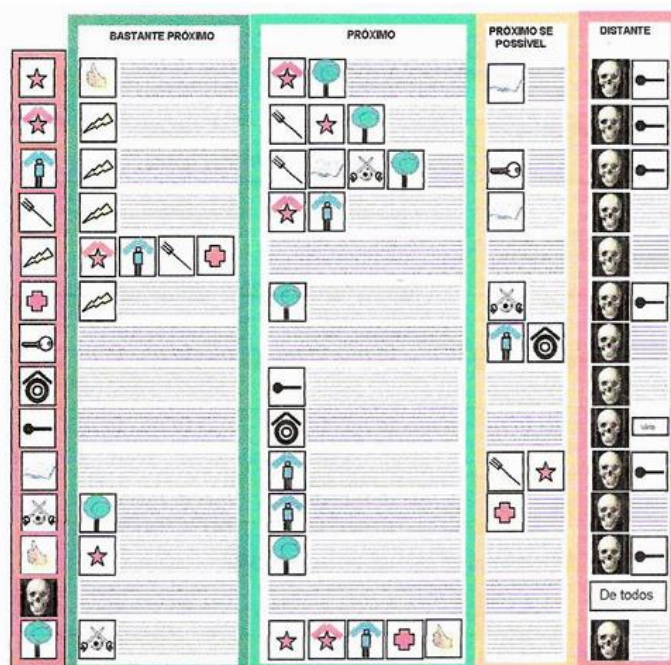
Esta organização espacial é composta por 14 núcleos funcionais, e é a posição relativa entre estes núcleos que determina a forma como a Unidade do tipo CANIFA é concebida. Na Figura 4 estão representados os 14 núcleos funcionais.



**Figura 4 - Núcleos Funcionais de uma Unidade CANIFA [5]**

É de ter em conta que nas Unidades tipo CANIFA, não há a obrigação de todos estes núcleos funcionais existirem. Isto acontece porque nem todas as Unidades têm a mesma finalidade. Um exemplo disso é o Núcleo de Instrução Teórica, que só tem razão de existência em Unidades que ministrem formação.

Na Figura 5 estão ilustradas as posições relativas que estão delineadas para estes núcleos, as quais deverão ser, sempre que possível, respeitadas na conceção deste tipo de Unidades.



**Figura 5 - Posição Relativa dos Núcleos Funcionais [5]**

Este conceito permitiu que as Unidades tipo CANIFA pudessem ser adaptadas a qualquer caso, pois trata-se de um método flexível e equilibrado para a dinâmica de uma Unidade e por isso mesmo este foi aplicado largamente em todo o país.

A 31 de Dezembro de 1960 a CANIFA/CANIE fazia referência através de um relatório às várias Unidades que tinham esta organização, as quais se indicam na Tabela 1.

**Tabela 1 - Lista das várias Unidades e o estado em que estas se encontravam (adaptado de A Engenharia Militar Portuguesa [6])**

<b>Quartéis Concluídos</b>	<b>Remodelações em Curso</b>
RI 1 Amadora (1955)	EPC Santarém
RI 2 Abrantes (1955)	EPC (Antiga) Torres Novas
RI 3 Beja (1956)	EPA Vendas-Novas
RI 5 Caldas (1952)	Centro Militar da Amadora
RI 6 Porto (1950)	HMR 1 Porto
RI 7 Leiria (1955)	BA 3 (edifícios) Tancos
RI 8 Braga (1955)	RAP 1 Sacavém
RI 10 Chaves (1958)	RAP 3 Figueira da Foz
RI 13 Vila-Real (1952)	BatMetr 2 Figueira da Foz
Novo Quartel da Encarnação (1960)	BatMetr 3 Porto
<b>Quartéis em Construção</b>	RI 12 Coimbra
RI 15 Tomar	BatCaç 6 Castelo Branco
RI 19 Funchal	BIInf 17 Angra do Heroísmo
<b>Em Estudo</b>	Quartel de Cavalaria 6 Porto
RI 9 Lamego	RE 1 (Pontinha) Lisboa
RI 11 Setúbal	
RC 8 Castelo Branco	<b>Remodelações em Estudo</b>
BIInf 18 Ponta Delgada	QG 3ª Região Militar Tomar
BCaç 2 Covilhã	HMP Lisboa
BCaç 3 Bragança	HMR Évora
RC 6 Guimarães	RA 5 Penafiel

Através deste relatório é possível observar que o número de Unidades afetadas pela CANIFA é elevado e abrange todo o país.

### 3.3. Regimento de Artilharia nº4

Nesta Dissertação de Mestrado a Unidade que será estudada será o Regimento de Artilharia nº4 de Leiria, mais precisamente um edifício de caserna. Na Figura 6 mostra-se uma fotografia aérea desta Unidade.



**Figura 6 - Fotografia aérea do RA 4 Leiria**

O Regimento de Artilharia nº 4 foi construído em 1955, sendo que a sua denominação na altura era Regimento de Infantaria nº 7, que foi extinto em 1975.

Através da Figura 6 é possível observar a organização espacial que é característica da CANIFA. Ao entrar nesta Unidade, a primeira nota a registar é o facto do Edifício de Comando se encontrar em frente à Porta de Armas, tomando assim uma posição de destaque em relação a todos os outros edifícios. Segue-se a Parada, que se inicia na retaguarda do Edifício de Comando e termina ao atingir o Refeitório. A Parada é limitada lateralmente por oito edifícios de caserna, quatro de cada lado.



### 3.4. Localização do Regimento de Artilharia nº4

O Regimento de Artilharia nº 4 localiza-se no Concelho de Leiria, o qual encontra-se representado na Figura 7. Destacado a vermelho tem-se a Freguesia de Leiria, Pousos, Barreira e Cortes, na qual a Unidade em questão se situa, mais precisamente na localidade de Casais da Cruz da Areia.

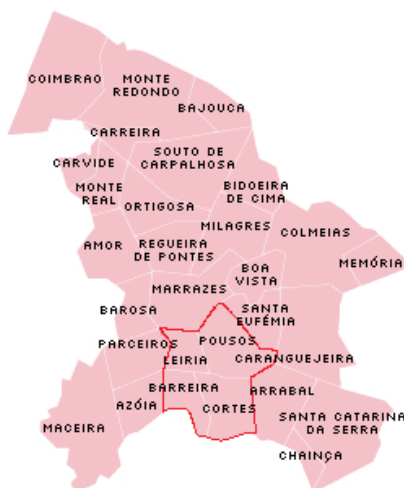


Figura 7 - Concelho de Leiria

### 3.5. Localização do Edifício de Caserna

No que toca aos edifícios de caserna, estes não são todos iguais. Os edifícios de caserna assinalados a verde na Figura 8 são edifícios de apenas um piso, enquanto os restantes, mais próximos do Refeitório e assinalados a vermelho, são edifícios de dois pisos. Para este estudo, o edifício de caserna escolhido foi o que está assinalado por uma cruz na Figura 8.



Figura 8 - Localização do Edifício de Caserna

### 3.6. Orientação do Edifício de Caserna

Relativamente à orientação do edifício, esta foi definida em relação ao Norte, sendo um dado importante que é necessário introduzir no programa utilizado para efetuar o estudo, o *EnergyPlus*<sup>®</sup>. Este dado foi obtido através do programa *AutoCAD*<sup>®</sup>, como se pode ver na Figura 9.



Figura 9 - Orientação do Edifício de caserna em relação ao Norte

Para esta região do país os correspondentes parâmetros climáticos de referência fornecidos pelo Despacho nº15793-F/2013 [7] estão indicados na Tabela 4 e Tabela 5. Para a definição dos parâmetros climáticos para esta localização é necessário fazer o ajuste dos parâmetros de referência para cada Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS III), o qual é realizado através da altitude do local. Para a determinação da zona climática da estação de aquecimento e de arrefecimento os critérios indicam-se na Tabela 2 e Tabela 3, respetivamente.

Tabela 2 - Critérios para Zona Climática de Aquecimento

Número de Graus-Dia [GD]	Zona
$GD \leq 1300$	I1
$1300 < GD \leq 1800$	I2
$GD > 1800$	I3

Tabela 3 - Critérios para Zona Climática de Arrefecimento

Temperatura Exterior Média [°C]	Zona
$\theta_{ext,v} \leq 20$	V1
$20 < \theta_{ext,v} \leq 22$	V2
$\theta_{ext,v} > 22$	V3

Para fazer o ajuste à localização do edifício de caserna, utilizou-se a seguinte equação:

$$X = X_{REF} + a (z - z_{REF}) \quad (1)$$

em que:

$X$  – para a estação de aquecimento representa o número de graus-dia ou a duração da estação em meses, enquanto para a estação de arrefecimento representa a temperatura exterior média;

$X_{REF}$  – valores de referência para cada NUTS III;

$a$  – declive para a realização da correção da altitude [mês/km] ou [°C/km];

$z$  – altitude do local em questão [km];

$z_{REF}$  – altitude de referência para cada NUTS III [km].

Com a aplicação desta equação obteve-se os seguintes valores para os parâmetros climáticos e consequente determinação da zona climática de aquecimento e arrefecimento, como é indicado na Tabela 4 e Tabela 5, respetivamente:

**Tabela 4 - Determinação da Zona Climática de Aquecimento**

$X_{REF}$	$a$	$z$	$z_{REF}$	$X$	Zona
1323	1900	0,1	0,126	1273,6	I1

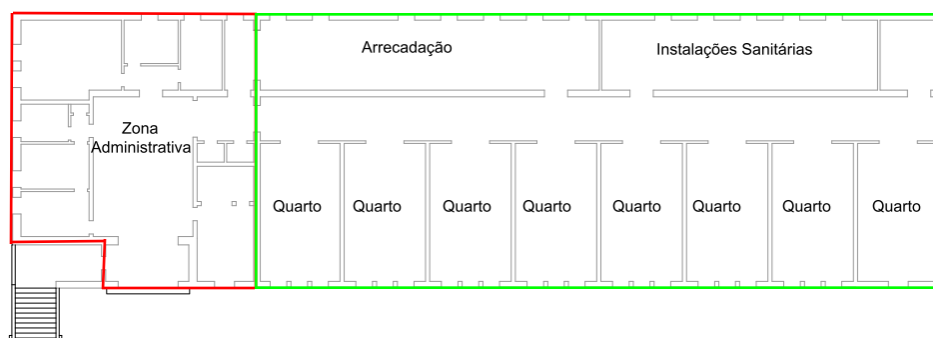
**Tabela 5 - Determinação da zona Climática de Arrefecimento**

$X_{REF}$	$a$	$Z$	$z_{REF}$	$X$	Zona
20,1	-2	0,1	0,126	20,15	V2

### 3.7. Caracterização do Edifício de Caserna

No que respeita à planta do edifício de caserna, regista-se que a mesma apresenta um comprimento de 56,15 metros, uma largura de 16,50 metros e uma altura total de 12,50 metros.

Relativamente à sua organização interior, existe uma primeira área à entrada que corresponde a uma zona administrativa e que também possui uma zona de arrecadação. A segunda área engloba o restante do edifício, a que corresponde uma zona onde se encontram os quartos, no total de oito, uma instalação sanitária e uma zona de arrecadação. A título de exemplo apresenta-se na Figura 10 a planta do primeiro piso.



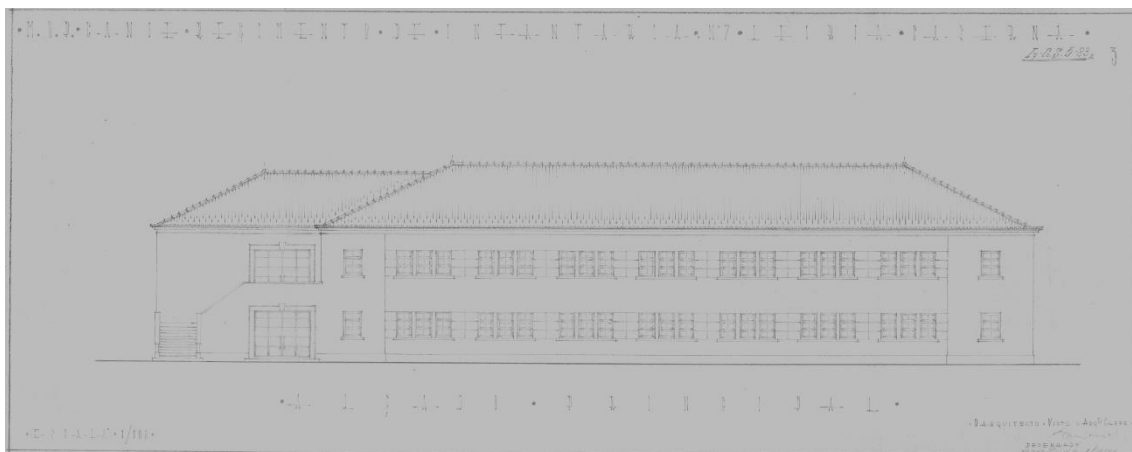
**Figura 10 - Planta do 1º Piso**

Ao fazer a passagem para o segundo piso, pode-se constatar que a geometria e a sua organização são idênticas às do primeiro piso, com a diferença apenas no acesso, que é através de uma escadaria exterior, como se pode ver na Figura 11.



**Figura 11 - Escadaria de Acesso ao Segundo Piso**

Em relação ao Alçado Principal, é visível o grande número de envidraçados, o que se justifica dado que é deste lado, Oeste, que se encontram os quartos, assim como os acessos ao primeiro e segundo pisos, como se pode ver na Figura 12.



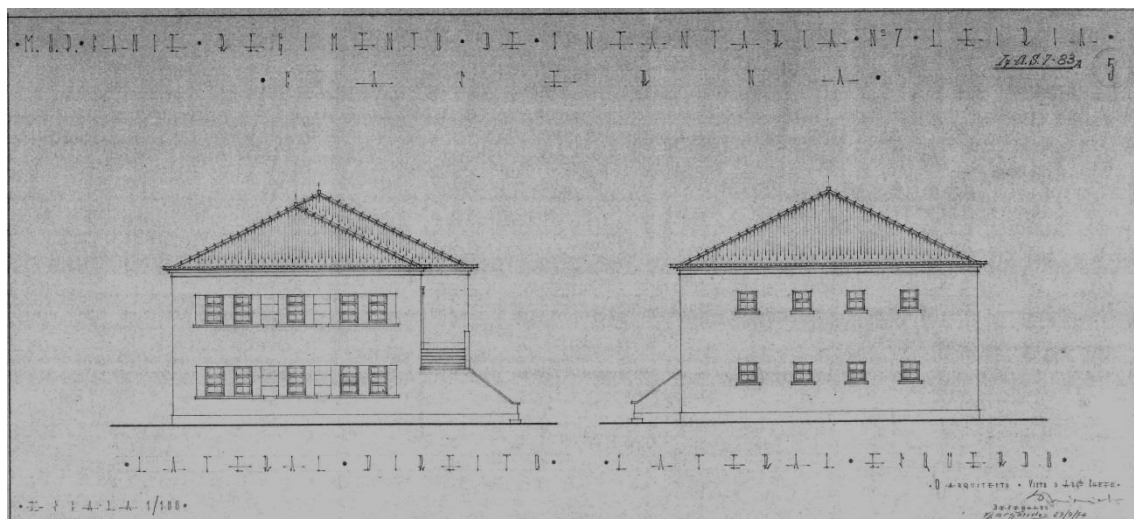
**Figura 12 - Alçado Principal**

Relativamente ao Alçado Posterior, que se mostra na Figura 13, fica orientado a Este e a sua área envidraçada é mais reduzida, dado que é nesta zona que se encontram as Instalações Sanitárias e a Zona de Arrecadação.



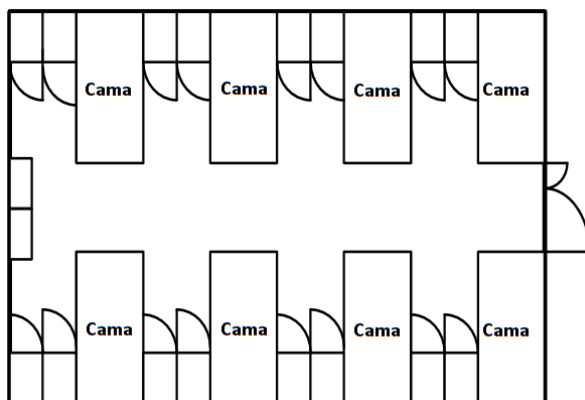
**Figura 13 - Alçado Posterior**

Através da Figura 14 é visível que no Alçado Direito, orientado a Norte, a área de envidraçados é superior à do Alçado esquerdo, orientado a Sul. Esta diferença explica-se pelo facto de os envidraçados do Alçado Direito pertencerem a divisões que em tempos seriam quartos, mas que na atualidade têm uma função orientada para tarefas administrativas ou para arrumos.



### 3.8. Caracterização dos Quartos

Como o edifício em estudo é um edifício de caserna, a sua principal função na Unidade é a de providenciar um espaço para alojamento e dormida dos militares, sendo por isso importante descrever os quartos, onde grande parte do estudo irá incidir. Os quartos possuem um pé-direito de 3,85 metros, e no que toca ao número de pessoas são todos iguais, com uma ocupação de 8 pessoas por quarto. A forma de ocupação de um quarto, através da localização das camas, pode ser observada na Figura 15.











**Figura 15 - Disposição de um Quarto**

### 3.9. Caracterização dos Elementos Construtivos

Na Tabela 6 indicam-se os vários elementos construtivos do edifício em estudo com base nas informações fornecidas pelo Oficial, do Regimento de Artilharia nº4, responsável pelas Infraestruturas.

**Tabela 6 - Constituição dos Elementos Construtivos**

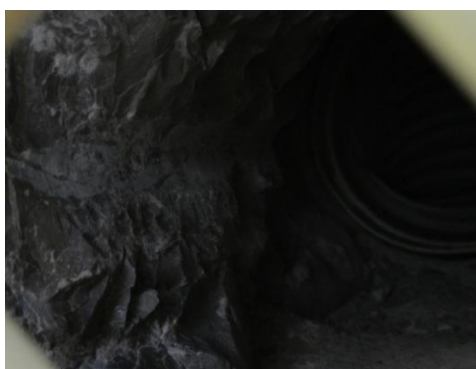
	Material	e(m)
Parede exterior 0.50 Ext  Int (1) (2) (3) (4)	(1) Reboco (2) Pedra Basalto (4) Reboco (3) Estuque	0.03 0.455 0.01 0.005
Parede exterior 0.40 Ext  Int (1) (2) (3) (4)	(1) Reboco (2) Pedra Basalto (4) Reboco (3) Estuque	0.03 0.355 0.01 0.005
Parede interior 0.25 Int  Int (1) (2) (3) (4) (5)	(1) Estuque (2) Reboco (3) Tijolo Furado (4) Reboco (5) Estuque	0.005 0.01 0.22 0.01 0.005
Parede interior 0.15 Int  Int (1) (2) (3) (4) (5)	(1) Estuque (2) Reboco (3) Tijolo Furado (4) Reboco (5) Estuque	0.005 0.015 0.11 0.015 0.005
Pavimento Intermédio (1) Int (2)  Int (3) (4) Int (5)	(1) Rev. Cerâmico (2) Argamassa (3) Laje Betão (4) Reboco (5) Estuque	0.015 0.01 0.15 0.01 0.005
Tecto do ultimo piso (1) Int (2)  Int (3)	(1) Laje Betão (2) Reboco (3) Estuque	0.15 0.015 0.005
Pavimento térreo (1) Int (2)  Int (3) Ext	(1) Rev. Cerâmico (2) Argamassa (3) Laje Betão	0.015 0.01 0.15
Cobertura inclinada (1) Ext  Int	(1) Telha	0.03

A grande dúvida que havia debatia-se sobre a constituição das paredes exteriores dos edifícios, sendo que não havia forma de analisar o seu interior sem utilizar métodos destrutivos, os quais estavam fora de questão. Apenas foi possível identificar a constituição do interior das paredes exteriores através de aberturas que estas possuem, como se mostra na Figura 16, que têm como função permitir a ventilação dos compartimentos.



**Figura 16 - Abertura na Parede Exterior para ventilação**

Através destas aberturas foi possível verificar que as paredes da envolvente são em alvenaria de pedra natural, nomeadamente de Basalto, como se pode observar na Figura 17.



**Figura 17 - Pormenor da abertura em que é visível a pedra natural**

No que diz respeito aos envidraçados, estes são compostos por vidro simples translúcido de 4 mm de espessura com caixilharia em alumínio, como se pode constatar na Figura 18. Estes envidraçados foram colocados durante uma intervenção de reabilitação para substituir as caixilharias originais de madeira, que se apresentavam degradadas, também com vidro simples transparente de 4 mm.



**Figura 18 - Pormenor da Caixilharia e do Envidraçado**



Um aspeto também relevante é o acesso a cada um dos pisos, composto por uma porta com uma grande percentagem de envidraçado, como é visível na Figura 19.



**Figura 19 - Acessos ao 1º e 2º Pisos**

A área de envidraçado dos acessos é composta por vidro simples transparente de 4mm.



## Capítulo IV

### 4. Caso de Estudo

O edifício sobre o qual o presente estudo recai é um edifício de caserna, como já foi referido anteriormente. O objetivo que se pretende atingir com o estudo é o de determinar uma solução de reabilitação térmica, de forma a alcançar as condições de conforto e bem-estar, recorrendo a um critério de análise de projetos que envolva o custo global da solução constituído, nomeadamente, pelo custo dos materiais e sua aplicação, e pelo custo de exploração do edifício no que concerne aos consumos energéticos para o conforto térmico.

Numa primeira parte do capítulo será dada uma explicação acerca do método que foi utilizado para efetuar o presente estudo. Numa segunda parte será explicado como foi feita a modelação do edifício no programa que foi utilizado, o *EnergyPlus*<sup>®</sup>. Por fim, as duas últimas partes incidirão sobre o estudo da qualidade do ar e estudo do desempenho energético do edifício em análise.

#### 4.1. Método de Análise

Pode dividir-se a análise do edifício em questão em duas grandes fases que, embora tendo objetivos diferentes, estão interligadas. A primeira grande fase incide sobre o estudo da Qualidade do Ar, ou seja, utilizando a modelação do edifício de caserna foi possível determinar as concentrações de Dióxido de Carbono dentro de um compartimento, neste caso um quarto. Assim sendo, foi possível obter as variações das concentrações de Dióxido de Carbono em função do número de renovações de ar e estimar o caudal necessário para manter a qualidade do ar nos níveis recomendados pela regulamentação. A segunda grande fase deste estudo recaiu sobre uma análise térmica dinâmica em que, primeiramente, foi realizada uma análise à construção com as características atuais, determinando-se o seu comportamento térmico e energético para os meses mais críticos de Inverno e de Verão. Posteriormente, foi realizado um estudo das necessidades energéticas do edifício com as soluções de reabilitação térmica, o qual permitiu determinar as espessuras de isolamento térmico mais adequadas com base numa análise de custos envolvendo as parcelas do custo de investimento, associada à solução de isolamento, e a parcela do custo energético associado ao conforto térmico com essa solução durante a utilização do edifício.

Relativamente à variação da concentração de Dióxido de Carbono no interior do quarto, esta não depende somente do número de ocupantes mas também do tipo de atividade que estes realizam no seu interior.

No que toca à reabilitação térmica, partiu-se do princípio que os elementos alvo seriam as paredes da envolvente, a cobertura e a laje térrea. Os vários parâmetros que influenciam o comportamento destes elementos, relativamente às trocas de calor entre o exterior e o interior, não se podem apenas resumir às especificações de cada material, e consequentemente de cada elemento, ou seja, há que ter em conta também a sua localização no edifício. Por último, o comportamento de um elemento não deve ser analisado isoladamente, mas em conjunto com os

restantes elementos da envolvente, uma vez que existem efeitos de interação que podem não ser desprezáveis.

O processo de determinação das espessuras mais adequadas do material isolante a aplicar em cada elemento construtivo exigiu a determinação da poupança energética associada a cada espessura. A determinação desta poupança e do custo que lhe fica associado é fundamental para a análise económica realizada, como se verá mais adiante neste trabalho. Para estimar a poupança associada a uma solução de isolamento térmico para dado elemento construtivo são primeiramente determinadas as necessidades energéticas da zona térmica com esse elemento construtivo nas condições atuais, ou seja, sem isolamento térmico. Segue-se depois o cálculo das mesmas necessidades energéticas mas agora com o elemento construtivo reabilitado, ou seja, com a solução de isolamento térmico integrada. A diferença entre os dois valores das necessidades energéticas corresponde à poupança que fica associada a essa solução.

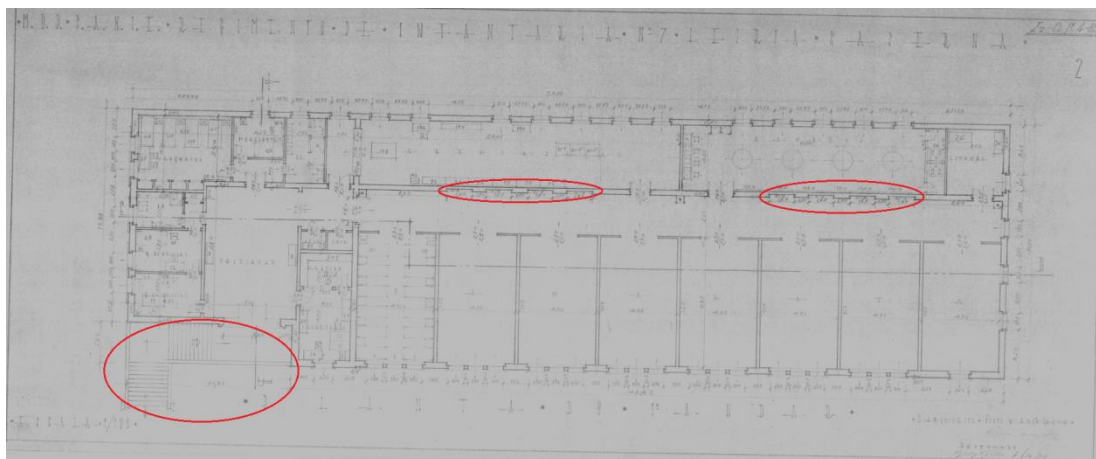
Todo este estudo, quer a análise da qualidade do ar como a análise térmica dinâmica, foi realizado com o suporte do programa *EnergyPlus*<sup>®</sup>, em que a modelação geométrica do edifício foi realizada através do programa *Google Sketchup*<sup>®</sup>, a qual se descreve, assim como a ligação entre os dois programas, na próxima secção.

## **4.2. Modelação do Edifício de Caserna**

A modelação deste edifício se tivesse sido realizada diretamente no *EnergyPlus*<sup>®</sup> teria sido muito morosa e exaustiva. Optou-se então por utilizar o programa *Google Sketchup*<sup>®</sup>, o qual, através da instalação de um *plug-in* do *EnergyPlus*<sup>®</sup>, torna possível introduzir a geometria do edifício e os vários elementos construtivos de uma forma mais célere e prática. Por seu turno, todas as características dos vários materiais e consequentemente dos elementos construtivos foram introduzidas a partir do *EnergyPlus*<sup>®</sup>. Um aspeto também importante foi a introdução dos vários parâmetros relativos à utilização e funcionamento do edifício durante o período considerado para o estudo. Toda esta modelação será explicada mais em pormenor nas secções seguintes.

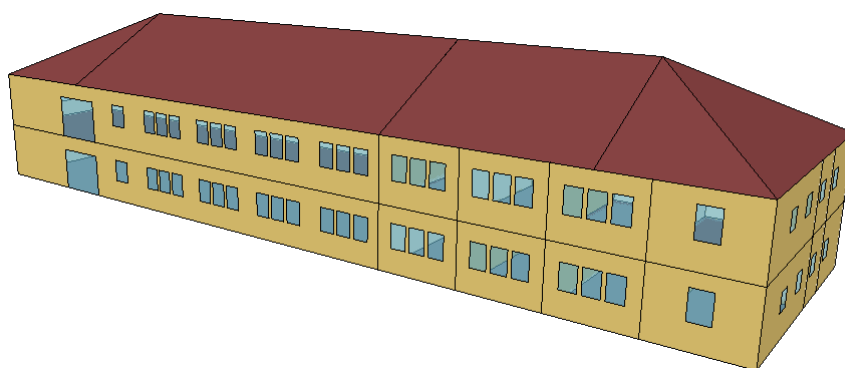
### **4.2.1. Geometria do Edifício**

Ao ser introduzida a geometria do edifício no *Google Sketchup*<sup>®</sup>, esta teve de ter como referência os planos médios dos elementos construtivos, pois não é possível introduzir a espessura destes. Houve também uma simplificação adotada no que diz respeito a pequenas saliências e reentrâncias que foram ignoradas, de forma a tornar a geometria mais uniforme e assim facilitar a criação das várias zonas térmicas. Exemplo destas simplificações são a remoção das escadas que dão acesso ao segundo piso, e de vários espaços de arrumos de pequenas dimensões localizados nos corredores, como é visível na Figura 20.



**Figura 20- Planta com as simplificações geométricas assinaladas**

Com estas alterações, as quais não introduzem discrepâncias significativas, foi criado o modelo, apresentado na Figura 21, que é uma modelação mais simples e ao mesmo tempo permite uma análise mais rápida e fácil.



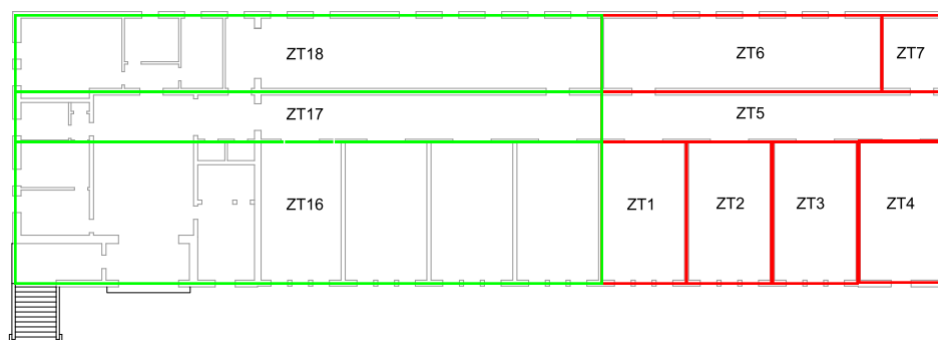
**Figura 21 - Geometria final inserida no Google Sketchup®**

#### **4.2.2. Zonas Térmicas – Thermal Zones**

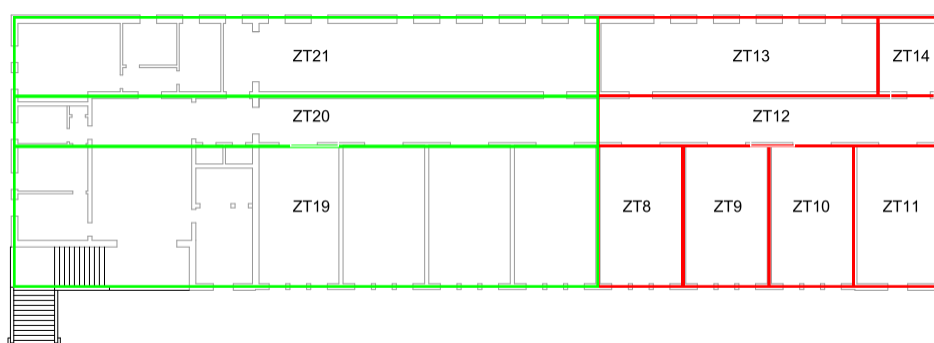
Ao realizar-se a modelação do edifício teve-se em conta a possibilidade de existência de espaços com comportamentos térmicos distintos. Por exemplo, espaços adjacentes a duas fachadas opostas, por receberem diferentes níveis de radiação solar, poderão apresentar comportamentos térmicos diferenciados. A forma de poder evidenciar comportamentos distintos no EnergyPlus é criar diferentes zonas térmicas. Zonas térmicas são zonas delimitadas por superfícies em que se admite que a temperatura ambiente interior é uniforme em todo o seu volume e que efetuam trocas de calor com o exterior ou com zonas adjacentes. As zonas térmicas podem simular um ou mais compartimentos, ou até mesmo um piso na sua totalidade. Este tipo de modelação vai ter repercussões na precisão dos resultados obtidos. Mais concretamente, se for criada uma zona térmica por compartimento ter-se-á um modelo de cálculo mais complexo mas os resultados obtidos

terão uma precisão maior. Se ao invés, for apenas criada uma zona térmica que abranja todo piso, ter-se-á um modelo de cálculo mais simplificado, mas os resultados obtidos terão menor precisão quando comparados com os do modelo mais pormenorizado.

Para este caso de estudo foram adotados dois níveis de pormenorização relativamente à modelação dos espaços, isto é, parte do edifício foi detalhada de forma a que uma zona térmica correspondesse a um compartimento, enquanto que a outra parte foi englobada em zonas térmicas de maiores dimensões, como é observável na Figura 22 e Figura 23.



**Figura 22 - Zonas Térmicas do 1º Piso**



**Figura 23 - Zonas Térmicas do 2º Piso**

Foi criado um modelo com um total de 22 zonas térmicas, onde o quarto, constituindo o compartimento alvo do estudo – dado que se trata de um edifício de caserna – se encontra representado por várias zonas térmicas. Assim, com as zonas térmicas ZT1 a ZT4 e ZT8 a ZT11, a simularem os quartos, foi possível recriar as condições reais de forma a obter o comportamento térmico correto dos vários compartimentos. Para não sobrecarregar muito o cálculo e a análise de resultados, por um lado, e porque os quartos ficaram bem representados pelas zonas térmicas referidas, por outro, considerou-se desnecessário continuar a modelação com o mesmo pormenor e, assim, foram criadas zonas térmicas mais alargadas para modelar o resto do edifício – zonas ZT16 a ZT18 no primeiro piso e ZT19 a ZT21 no segundo piso. A distribuição final de zonas térmicas a que se chegou permitiu que o modelo de cálculo fosse mais simples e, ao mesmo tempo, preciso nos

resultados. A opção por fazer corresponder uma zona térmica a um compartimento, apesar de poder ser mais rigorosa, tornaria o modelo mais complexo e mais moroso na aquisição de resultados, pelo que não foi seguida.

Relativamente à Cobertura, esta foi dividida em duas zonas térmicas, ZT15 e ZT22, em que a primeira se encontra sobre a parte mais detalhada do edifício enquanto a segunda sobre as zonas térmicas mais gerais.

#### **4.2.3. Parâmetros de Simulação – *Simulation Parameters***

Descrevendo um pouco o programa *EnergyPlus*<sup>®</sup>, a entrada de dados é feita a partir do editor IDF, extensão que fica associada ao ficheiro criado com o programa. A primeira secção do editor é composta pelos parâmetros de simulação. Nesta secção pode ser visualizada a versão do programa, que neste caso foi a 7.1, assim como o tipo de simulação que foi adotada, a qual no presente caso recorreu a ficheiros climáticos anuais e incidiu em períodos de tempo determinados. Foi nesta mesma secção que foram introduzidos os dados acerca da orientação do edifício, mostrada na Figura 9.

O tipo de terreno que envolve o edifício em causa, também é um aspeto a ter em conta, isto porque o programa, consoante a envolvente escolhida, irá construir um perfil da velocidade do vento em função da altura. Para este estudo foi escolhida uma zona envolvente citadina.

O programa pode interpretar a distribuição da radiação solar recebida pela área de envidraçados de diferentes formas, sendo que cabe ao utilizador escolher a análise que melhor se adapte ao estudo. Relativamente às diferentes interpretações do programa acerca da distribuição solar, este dá a possibilidade de escolher uma de cinco possibilidades, a saber: *MinimalShadowing*, *FullExterior*, *FullInteriorAndExterior*, *FullExteriorWithReflections* e, por fim, *FullInteriorAndExteriorWithReflections*. Ao escolher o *MinimalShadowing*, a forma mais simples de considerar a distribuição da radiação solar, a análise é feita considerando dois aspetos: a) considera que não existe qualquer tipo de sombreamento no exterior, apenas entrando em conta com reentrâncias da envolvente do edifício; b) considera que a radiação solar numa zona térmica incide totalmente sobre o pavimento, e que a parte que não é absorvida por este é refletida para o interior e repartida proporcionalmente pelos restantes elementos do espaço. Se a escolha for o *FullExterior* ou o *FullExteriorWithReflections*, na análise, para além dos aspetos considerados no *MinimalShadowing*, serão também considerados os sombreamentos provocados por elementos exteriores, por exemplo a existência de palas. Relativamente às opções *FullInteriorAndExterior* e *FullInteriorAndExteriorWithReflections*, todos os aspetos mencionados anteriormente são considerados, mas são distintos na parte respeitante à distribuição da radiação solar. Nestes dois métodos a distribuição da radiação solar incidente é feita corretamente por todas as superfícies, e não tão somente pelo pavimento, a partir de considerações geométricas complexas. Neste caso de estudo a opção escolhida foi o *FullInteriorAndExterior*, pois desta forma foi possível obter uma maior precisão nos resultados.

É também nesta secção, *Simulation Parameters*, que é tido em conta qual o poluente no interior da zona térmica que se quer analisar. O programa considera por defeito o Dióxido de Carbono como

o poluente num compartimento e permite ainda adicionar outro poluente se for necessário, sendo necessário introduzir a forma estes são produzidos, aspeto que será detalhado mais à frente. Para o edifício em estudo apenas foi considerado o Dióxido de Carbono como poluente interior.

Por fim, o último aspeto a ter em conta nesta secção é o *TimeStep*, ou seja, qual o número de iterações realizadas por hora. Este valor ao ser alto irá diminuir o intervalo de tempo de cada iteração, por exemplo, se for introduzido o valor de sessenta isto representa que cada iteração corresponde a um minuto. Para a situação em estudo foi adotado um *TimeStep* de 6, ou seja, cada iteração equivale a dez minutos.

#### 4.2.4. Localização e Clima – Location and Climate

Localização e Clima é a segunda secção do editor do *EnergyPlus*<sup>®</sup>. O primeiro parâmetro a considerar é a localização, em que é necessário introduzir a latitude, a longitude, a elevação e o fuso horário, dados estes que se indicam na Tabela 7.

**Tabela 7 - Dados relativos à localização do Edifício de Caserna**

<b>Latitude [Graus]</b>	39,43
<b>Longitude [Graus]</b>	8,48
<b>Fuso Horário</b>	0
<b>Elevação [metros]</b>	100

O segundo parâmetro é o período durante o qual o programa irá realizar a análise ao edifício, *RunPeriod*. Para o presente caso, a metodologia que se adotou para encontrar este período de tempo foi a definição que se encontra no anterior regulamento térmico – o RCCTE. Desta forma, foram determinados dois períodos de corrida, correspondentes à estação de aquecimento e à de arrefecimento. O estabelecimento dos limites da estação convencional de aquecimento foi conseguido ao determinar o seu início através do primeiro decêndio, após 1 de Outubro, em que a temperatura média diária correspondesse a um valor inferior a 15°C, e o seu término através do último decêndio, antes de 31 de Maio, em que o valor da temperatura média diária não fosse superior a 15°C. Relativamente à estação convencional de arrefecimento, esta é constituída pelos meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro. Estas duas estações permitiram obter as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento, respetivamente, do edifício.

Foram também tidos em conta os feriados nacionais, isto porque se tratam de dias em que a utilização do edifício é substancialmente diferente quando comparada com os restantes dias. Esta diferenciação é conseguida através do parâmetro *RunPeriodControl:SpecialDays*. Também foi possível contabilizar os períodos de mudança de hora, através do parâmetro *RunPeriodControl:DaylightSavingTime*, no qual foram introduzidas as várias datas correspondentes ao ano civil atual.

Para terminar esta secção, o último parâmetro a preencher foi o *GroundTemperature:BuildingSurface*, ou seja, a introdução das temperaturas médias mensais do



solo. É um fator importante, pois vai afetar significativamente as trocas de calor entre a laje térrea e o solo. Para obter estes valores, foi necessário utilizar um programa auxiliar, o *slab*. Esta aplicação efetua o cálculo das temperaturas recorrendo ao ficheiro climático e às características do solo e da laje térrea, apresentando no final a temperatura média para cada mês. A Tabela 8 apresenta os valores introduzidos neste parâmetro.

**Tabela 8 - Temperatura média do solo ao longo dos diferentes meses**

Meses	Temperatura [°C]
Janeiro	17,06
Fevereiro	16,81
Março	16,84
Abril	18,32
Maio	18,73
Junho	18,92
Julho	20,41
Agosto	20,47
Setembro	20,55
Outubro	20,57
Novembro	19,26
Dezembro	18,84

#### **4.2.5. Horários – Schedules**

Nesta secção é onde o utilizador tem a possibilidade de programar vários aspetos relacionados com a utilização do edifício. Para o caso em questão foram criados diferentes horários, *Schedules*, para controlar algumas funções e assim efetuar a simulação da utilização do edifício o mais próximo possível da realidade. De seguida serão explicadas as funções que foram objeto de controlo através da criação de horários de funcionamento.

##### **4.2.5.1. Período de Ocupação**

O primeiro horário de utilização diz respeito ao número de ocupantes presentes nos quartos. Admitiu-se que todos os ocupantes se encontram no quarto, num total de 8 pessoas, no período definido entre as 18:00 horas e as 07:00 horas. Fora deste período os quartos encontram-se vazios.

##### **4.2.5.2. Iluminação Artificial**

O segundo horário refere-se à utilização de iluminação artificial. Esta considerou-se ativa para o período delimitado entre as 20:00 horas e as 00:00 horas.

#### 4.2.5.3. Concentração de Dióxido de Carbono

O terceiro horário criado é relativo à concentração base de Dióxido de Carbono na atmosfera, tendo-se admitido que esta concentração, com o valor de 350 ppm, era constante ao longo de todos os dias.

Para uma melhor leitura, a Tabela 9 apresenta os horários que são gerais a toda a simulação.

**Tabela 9 - Horários Gerais à Simulação**









	<b>Período de Ocupação (8 ocupantes)</b>	<b>Iluminação Artificial</b>	<b>Concentração Exterior de CO<sub>2</sub> (ppm)</b>
<b>Início</b>	18:00	20:00	Todos os dias
<b>Fim</b>	07:00	00:00	

Para além destes horários que foram referidos, foram criados mais alguns que são específicos tanto para o estudo sobre a qualidade do ar como para o estudo térmico. Nas respetivas secções estes irão ser explicados detalhadamente para uma melhor compreensão do estudo.

#### 4.2.6. Elementos Construtivos – *Surface Construction Elements*

Nesta secção o objetivo é a criação dos vários elementos construtivos, mas para tal é necessário criar numa primeira fase os materiais que os constituem, bem como as suas características relevantes para a simulação. Para a criação de um material é necessário introduzir os seguintes dados: a rugosidade, a espessura, a condutividade térmica, o peso volúmico e o calor específico. Na Tabela 10 apresentam-se os materiais utilizados, as suas características, e a forma como estão dispostos na constituição dos diferentes elementos construtivos.

**Tabela 10 - Elementos Construtivos e Materiais Constituintes**

	Material	e(m)	$\lambda$ (W/m.K)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	C (J/Kg.K)
Parede exterior 0.50					
Ext  Int	(1)Reboco	0.03	1.3	1900	1000
	(2)Pedra Basalto	0.455	1.1	2850	850
	(4)Reboco	0.01	1.3	1900	1000
(1) (2) (3) (4)	(3) Estuque	0.005	0.4	1000	1090
Parede exterior 0.40					
Ext  Int	(1)Reboco	0.03	1.3	1900	1000
	(2)Pedra Basalto	0.355	1.1	2850	850
	(4)Reboco	0.01	1.3	1900	1000
(1)(2)(3)(4)	(3) Estuque	0.005	0.4	1000	1090
Parede interior 0.25					
Int  Int	(1)Estuque	0.005	0.4	1000	1090
	(2)Reboco	0.01	1.3	1900	1000
	(3)Tijolo Furado	0.22	0.379	633	920
(1)(2)(3)(4)(5)	(4)Reboco	0.01	1.3	1900	1000
	(5) Estuque	0.005	0.4	1000	1090
Parede interior 0.15					
Int  Int	(1)Estuque	0.005	0.4	1000	1090
	(2)Reboco	0.015	1.3	1900	1000
	(3)Tijolo Furado	0.11	0.379	633	920
(1)(2)(3)(4)(5)	(4)Reboco	0.015	1.3	1900	1000
	(5) Estuque	0.005	0.4	1000	1090
Pavimento Intermédio					
(1) Int  Int	(1)Rev. Cerâmico	0.015	1.3	2300	840
(2)	(2)Argamassa	0.01	1.3	1900	1000
(3)	(3)Laje Betão	0.15	1.36	2150	1080
(4)	(4)Reboco	0.01	1.3	1900	1000
(5) Int	(5)Estuque	0.005	0.4	1000	1090
Tecto do ultimo piso					
(1) Int  Int	(1)Laje Betão	0.15	1.36	2150	1080
(2)	(2)Reboco	0.015	1.3	1900	1000
(3) Int	(3)Estuque	0.005	0.4	1000	1090
Pavimento térreo					
(1) Int  Int	(1)Rev. Cerâmico	0.015	1.3	2300	840
(2)	(2)Argamassa	0.01	1.3	1900	1000
(3) Ext	(3)Laje Betão	0.15	1.36	2150	1080
Cobertura inclinada					
(1) Ext  Int	(1)Telha	0.03	0.34	200	920

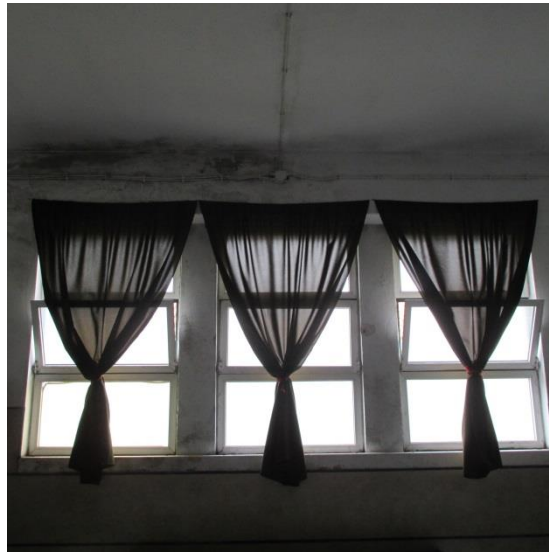
Relativamente às zonas térmicas ZT16 a ZT21, apesar de terem sido modeladas sem a existência de paredes interiores, a sua massa térmica foi considerada através do parâmetro *InternalMass*, que exige apenas a introdução da área total de superfícies interiores na respetiva zona. Na Tabela 11 indicam-se os respetivos dados para cada zona térmica.

**Tabela 11 - Áreas de cada Elemento Construtivos nas várias Zonas Térmicas**

	Elemento construtivo	Área [m <sup>2</sup> ]		Elemento construtivo	Área [m <sup>2</sup> ]
<b>ZT16</b>	Parede Interior 0,15	16,65	<b>ZT19</b>	Parede Interior 0,15	16,65
	Parede Interior 0,25	144,47		Parede Interior 0,25	144,47
	Parede Interior 0,40	31,96		Parede Interior 0,40	31,96
<b>ZT17</b>	Parede Interior 0,25	6,35	<b>ZT20</b>	Parede Interior 0,25	6,35
<b>ZT18</b>	Parede Interior 0,15	48,51	<b>ZT21</b>	Parede Interior 0,15	48,51

#### 4.2.7. Dispositivos de Sombreamento – *Window Shading Control*

O edifício em questão apenas possui dispositivos de sombreamento nos quartos, sendo estes do tipo cortinado, como é indicado na Figura 24.



**Figura 24 - Sombreamento num quarto**

De forma a ser possível simular este tipo de dispositivo, foi considerado um elemento de capacidade de reflexão baixa e com uma capacidade de transmissão de calor média.

A consideração destes dispositivos é relevante para minimizar os ganhos solares, pelo que foram ativados na estação quente, onde os ganhos são desfavoráveis para o conforto térmico. Ao contrário, na estação fria, mantiveram-se abertos para captar os ganhos solares, que são favoráveis nesta estação, contribuindo para aquecer passivamente os espaços interiores. A ativação destes dispositivos durante a estação de arrefecimento foi programada para acontecer sempre que o nível da radiação solar incidente nos vãos envidraçados excedesse os  $300 \text{ W/m}^2$ .

#### 4.2.8. Ganho Internos – *Internal Gains*

Esta secção do editor IDF é importante, pois as necessidades energéticas dos edifícios não são apenas devidas às condições ambientais e às características construtivas da envolvente. Há outros fatores que podem afetar as trocas de calor e, conseqüentemente, as necessidades energéticas. Todas as fontes internas de energia térmica, como a presença de pessoas, a iluminação artificial e outros tipos de equipamentos elétricos constituem ganhos internos e, como tal, influenciam as necessidades energéticas.

Para este caso de estudo considerou-se que em termos de ganhos internos, apenas seriam considerados como fatores significativos as pessoas e a iluminação artificial. Como foi referido na secção 4.2.5, foram criados horários que estabeleciam o período de ocupação e de funcionamento da iluminação artificial.

#### 4.2.8.1. Iluminação Artificial - *Lights*

No que toca à iluminação artificial, foi possível determinar que esta era composta por duas lâmpadas tubulares fluorescentes em cada quarto, como a Figura 25 demonstra.



Figura 25 - Iluminação artificial de um quarto

O editor neste parâmetro permite quantificar a potência da iluminação através de três formatos distintos. O primeiro é através da introdução do valor total da potência das lâmpadas, *LightingLevel*, o segundo é através da relação entre a potência total de iluminação e a área de pavimento, *Watts/Area*, e o terceiro é através do método anterior mas ao invés de utilizar a área de pavimento utiliza o número de ocupantes, *Watts/Person*. Destes três métodos, o que foi escolhido foi o *LightingLevel*, tendo-se admitido um valor total de 70 W.

#### 4.2.8.2. Pessoas – *People*

Existem três formatos distintos que o programa disponibiliza para considerar os ganhos internos devido aos ocupantes: *People*, em que basta introduzir o número de ocupantes, *People/Area*, em que se introduz o valor correspondente à relação entre o número de ocupantes e a área de pavimento e, por último, *Area/People*, em que o valor a tomar é o inverso da relação anterior. O formato adotado foi *People*, por uma questão de simplificação, tendo sido introduzido o valor de 8 ocupantes.

Para além do horário – Tabela 9 – que estipula a presença ou não de ocupantes no quarto, foi criado um horário relacionado que define o tipo de atividade dos ocupantes e, consequentemente, os ganhos que daí advêm. Deve ser definido o tipo de atividade e a delimitação do intervalo de tempo em que a mesma ocorre. As atividades consideradas foram as seguintes: Dormir/Repouso e Sedentária/Moderada. Relativamente ao intervalo de tempo para cada uma das atividades, foi definido que no período das 00:00 horas às 07:00 horas ocorria a atividade Dormir/Repouso, enquanto a atividade Sedentária/Moderada foi limitada ao período entre as 18:00 horas e as 00:00 horas. Na Tabela 12 é indicado os horários para cada atividade assim como os níveis de metabolismo correspondentes a cada uma delas.

Tabela 12 - Atividades com respetivos horários e níveis de metabolismo

	Início	Fim	Nível de Metabolismo [W/Ocupante]
Dormir/Repouso	01:00	07:00	81
Sedentária/Moderada	18:00	00:00	144

### 4.3. Estudo da Qualidade do Ar

A composição do ar interior de um compartimento é afetada por inúmeros fatores, como resultado da sua interação com o ar exterior e com as emissões de poluentes que se encontrem no seu interior. Relativamente às fontes de poluentes, estas dependem do tipo de utilização do compartimento ou do estado de degradação do mesmo. De facto, a qualidade do ar interior é afetada quer por agentes microbianos originados por certo tipo de atividades quer pela libertação de componentes nocivos provenientes dos materiais de construção. Uma fonte de contaminação é o próprio ser Humano, cuja respiração é acompanhada da libertação de Dióxido de Carbono e este, em espaços reduzidos e mal ventilados, pode atingir concentrações tais que gerem mal-estar e, em casos extremos, asfixia dos ocupantes.

No presente caso de estudo, dado que a função principal do edifício é a de alojar conjuntos de pessoas em espaços confinados (quartos) durante períodos prolongados de tempo, torna-se importante efetuar um estudo da qualidade do ar desses espaços. A presença nos quartos de um elevado número de ocupantes durante o período noturno, pode constituir uma importante fonte de produção de CO<sub>2</sub>, com reflexos na qualidade do ar, e portanto, nas condições de habitabilidade desses espaços.

#### 4.3.1. Produção de Dióxido de Carbono

A produção de CO<sub>2</sub> acontece nos horários de ocupação dos quartos e depende do tipo de atividade aí realizada pelos ocupantes. Assim, o horário de ocupação deve ser dividido em tantos períodos quantas as atividades consideradas e, para cada um desses períodos, que fica assim associado a um tipo de atividade, deve ser definida uma taxa de produção de CO<sub>2</sub>. Relativamente à taxa de produção de CO<sub>2</sub>, o valor mínimo, por defeito, é  $3,82 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{W}$ , sendo este um valor que quantifica a taxa de produção por nível de atividade metabólica, e que corresponde ao formato sob o qual deve ser fornecida a taxa de produção de CO<sub>2</sub> ao *EnergyPlus*®. Estimativas mais realistas da taxa de produção de CO<sub>2</sub>, em função do tipo/nível de atividade podem ser efetuadas com base nos dados apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Emissões de CO<sub>2</sub> por Pessoa e Atividade [8]

Atividade	Respiração por Pessoa [m <sup>3</sup> /h]	Emissão de CO <sub>2</sub> por Pessoa [m <sup>3</sup> /h]
Dormir	0,3	0,013
Descansar/Sedentária	0,5	0,02
Moderada	2 a 3	0,08 a 0,13
Alta	7 a 8	0,33 a 0,38

As atividades consideradas passíveis de ocorrer nos quartos no seu período de ocupação dividiram-se em Sedentária/Moderada e Dormir/Repouso. Para estas atividades, a Tabela 14 indica o valor da respetiva taxa metabólica, em que uma unidade de *met* corresponde a 58,1 W/m<sup>2</sup>.

**Tabela 14 - Taxa metabólica para cada atividade**

	Nível de Metabolismo [W/Ocupante]	met
<b>Dormir/Repouso</b>	81	0,8
<b>Sedentária/Moderada</b>	144	1,4

Recorrendo à Tabela 13 e à Tabela 14, às taxas de produção que foram introduzidas como dados do *EnergyPlus®*, correspondentes às atividades Dormir/Repouso e Sedentária/Moderada, foram calculadas como se indica.

- Dormir/Repouso

$$Taxa = \frac{0,013}{3600 \times 81} = 4,46 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s} \cdot W \quad (2)$$

- Sedentária/Moderada

$$Taxa = \frac{0,04}{3600 \times 144} = 7,70 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s} \cdot W \quad (3)$$

O programa *EnergyPlus®* efetua o balanço da concentração de CO<sub>2</sub> no interior juntamente com o valor que é produzido no compartimento, tal como determinado acima, e com o valor que se junta proveniente do exterior. Quanto à concentração de CO<sub>2</sub> no exterior, foi utilizado o valor de 350 ppm (partes por milhão), que é um valor corrente e que é utilizado por defeito pelo programa.

#### 4.3.2. Concentração de Dióxido de Carbono

A avaliação da qualidade do ar realizada neste estudo utilizará como referência as exigências da atual regulamentação – RECS – e também, para efeitos comparativos entre regulamentações, os requisitos referentes à anterior regulamentação – RSECE.

No que diz respeito a concentrações de poluentes em edifícios, o RSECE apresenta como valores máximos das concentrações os indicados na Tabela 15.

**Tabela 15 - Concentrações máximas de referência de poluentes no interior dos edifícios existentes [9]**

Parâmetros	Concentração máxima de referência (mg/m <sup>3</sup> )
Partículas suspensas no ar (PM10).....	0,15
Dióxido de carbono .....	1800
Monóxido de carbono .....	12,5
Ozono .....	0,2
Formaldeído .....	0,1
Compostos orgânicos voláteis totais .....	0,6

O valor correspondente ao CO<sub>2</sub> está apresentado na unidade mg/m<sup>3</sup>. Para obter o correspondente valor em ppm foi utilizada a seguinte relação:

$$ppm = (mg/m^3) \times \frac{24,46}{MM} \quad (4)$$

em que:

MM – Massa Molar do poluente [g/mol];

Apresentando o Dióxido de Carbono uma massa molar de 44,01g/mol, obtém-se, por aplicação da equação 4, uma concentração em partes por milhão de 1000 ppm.

Relativamente ao RECS, este faz a distinção entre edifícios novos e já existentes. Para os edifícios já existentes, para além do limiar de proteção, houve também a consideração de uma margem de tolerância, como apresentado na Tabela 16.

**Tabela 16 - Limiar de proteção e margem de tolerância para os poluentes físico-químicos [10]**

Poluentes	Unidade	Limiar de proteção	Margem de tolerância (MT) [%]
Partículas em suspensão (fração PM <sub>10</sub> )	[µg/m <sup>3</sup> ]	50	100
Partículas em suspensão (fração PM <sub>2,5</sub> )	[µg/m <sup>3</sup> ]	25	100
Compostos Orgânicos Voláteis Totais (COVs)	[µg/m <sup>3</sup> ]	600	100
Monóxido de carbono (CO)	[mg/m <sup>3</sup> ]	10	-
	[ppmv]	9	-
Formaldeído (CH <sub>2</sub> O)	[µg/m <sup>3</sup> ]	100	-
	[ppmv]	0,08	-
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	[mg/m <sup>3</sup> ]	2250	30
	[ppmv]	1250	-
Radão	[Bq/m <sup>3</sup> ]	400	-

Como é visível, o limiar de proteção é superior, em relação à regulamentação anterior, em 250 ppm, mas há que ter em atenção que estes limiares de proteção dizem respeito a uma média de 8 horas. No que diz respeito às margens de tolerância, estas apenas são aplicáveis se os edifícios novos e existentes não possuírem sistemas mecânicos de ventilação. Neste caso, a margem de tolerância corresponderia a uma concentração total de CO<sub>2</sub> de 1625 ppm.

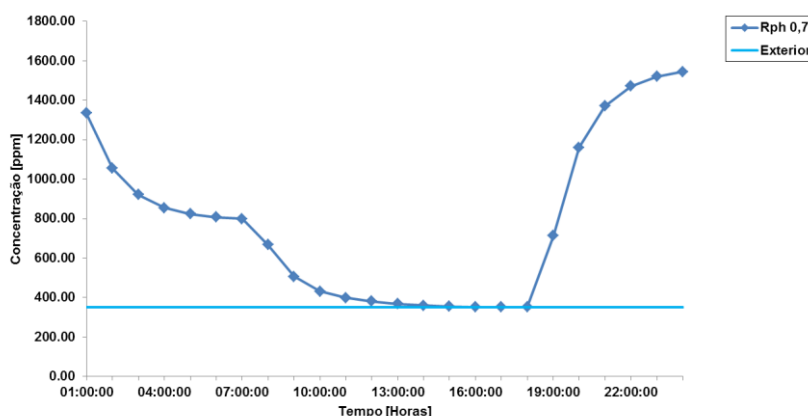
Como o valor real de renovações por hora para os quartos é desconhecido, visto não existir nenhum sistema de ventilação mecânica para esse efeito, foi efetuado um estudo de sensibilidade da variação temporal da concentração de CO<sub>2</sub> nos quartos, em função da taxa de ventilação, de forma a perceber as tendências de evolução e identificar os valores máximos atingidos. Este estudo de sensibilidade foi realizado para os seguintes valores das taxas de renovação horária indicados na Tabela 17.



**Tabela 17 - Renovações por Hora adotadas para o estudo**

Renovações de Ar [1/Hora]			
0,7	0,8	0,9	1,0

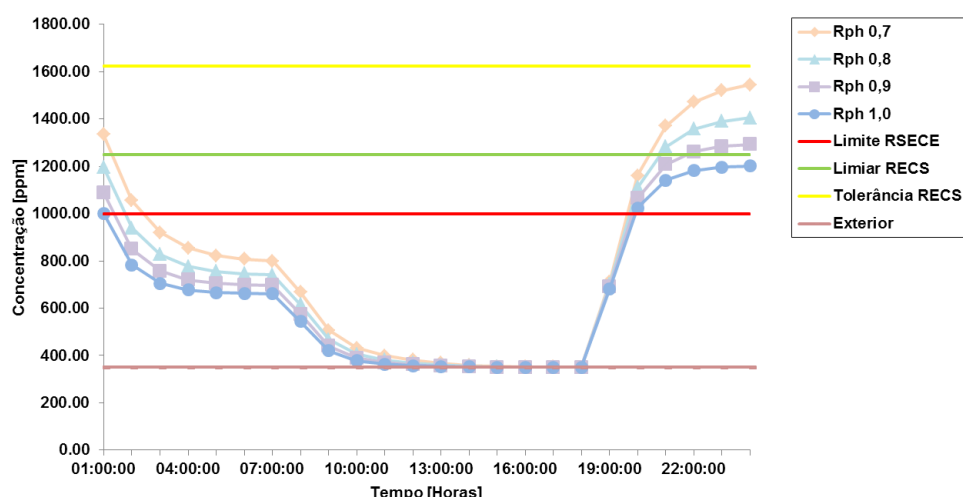
A variação típica da concentração de CO<sub>2</sub> no interior mostra-se na Figura 26 para o caso duma taxa de renovação do ar igual a 0,7. Como visível na Figura 26, a concentração de CO<sub>2</sub> tem ciclos de subida e descida e apresenta um valor máximo que, para o valor de 0,7 de taxa de renovação, é cerca de 4 vezes superior ao valor da concentração exterior.



**Figura 26 - Concentrações de CO<sub>2</sub> para o dia 17 de Janeiro**

Como é possível constatar existem três períodos distintos de evolução da concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do dia. No primeiro período a evolução da concentração é decrescente e corresponde ao intervalo de tempo entre as 01:00 horas e as 07:00 horas, ou seja, o período em que a totalidade dos ocupantes se encontra no compartimento. Ao ser decrescente, a evolução, significa que o efeito de varrimento do caudal de ar de renovação sobrepõe-se à produção de CO<sub>2</sub> pelos ocupantes, resultando do balanço uma diminuição da concentração interior de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo. Relativamente ao segundo período, este tem início às 07:00 horas e também apresenta uma evolução decrescente da concentração de CO<sub>2</sub>, mas neste caso mais acentuada do que no período anterior. Tal deve-se ao facto de o compartimento ficar desocupado a partir dessa hora. Devido à ausência de ocupantes e à renovação contínua do ar interior, o valor da concentração interior de CO<sub>2</sub> desce rapidamente, aproximam-se, e chegando mesmo a atingir, o valor de CO<sub>2</sub> do exterior. Quando o compartimento volta a ser ocupado, inicia-se novamente a produção de CO<sub>2</sub>, verificando-se um aumento da concentração interior de CO<sub>2</sub> até atingir um valor máximo, após o que ocorre o ciclo de descida atrás relatado.

Na Figura 27 apresenta-se a variação de CO<sub>2</sub> que ocorre ao longo de um dia para a totalidade das taxas de ventilação utilizadas neste estudo de sensibilidade. Nesta figura estão também representados os limites máximos da concentração de CO<sub>2</sub> dos regulamentos já referidos.



**Figura 27 - Variação da Concentração de CO<sub>2</sub> em função das Renovações de Ar e valores estipulados pelos regulamentos**

Como é visível na Figura 27 a concentração de CO<sub>2</sub> diminui com o aumento da taxa de ventilação, sendo nítida a queda dos valores máximos no período da noite mais crítico. Em todos os casos existe uma altura do dia, no período em que os quartos se encontram desocupados, em que se atinge o valor da concentração exterior, o que indica que se consegue a limpeza completa do ar relativamente ao efeito da presença humana.

Também se observa na Figura 27 que para todas as taxas de ventilação ensaiadas o limite de concentração imposto pela anterior regulamentação (RSECE) é ultrapassado, e só com uma taxa de ventilação mínima de uma renovação horária é possível manter os níveis de concentração de CO<sub>2</sub> abaixo do limiar estipulado pela atual regulamentação no período de ocupação.

Uma outra forma de abordar o problema é utilizar a exigência do caudal mínimo de ar novo em função da atividade desenvolvida pelos ocupantes. Segundo esta abordagem, o RSECE, em função do tipo de atividade, apresenta os seguintes valores mínimos para o caudal de ar novo indicados na Tabela 18.

**Tabela 18 - Caudais mínimos de ar novo [9]**

Tipo de actividade		Caudais mínimos de ar novo	
		[m <sup>3</sup> /(h.ocupante)]	[m <sup>3</sup> /(h.m <sup>2</sup> )]
Residencial .....	Salas de estar e quartos .....	30	
Comercial .....	Salas de espera .....	30	
	Lojas de comércio .....		5
	Áreas de armazenamento .....		5
	Vestiários .....		10
	Supermercados .....	30	5
Serviços de refeições .....	Salas de refeições .....	35	
	Cafetarias .....	35	35
	Bares, salas de cocktail .....	35	35
	Sala de preparação de refeições .....	30	
Empreendimentos turísticos .....	Quartos/suites .....	30	
	Corredores/átrios .....		5

Para o presente caso, como é visível, os valores exigidos são 30 m<sup>3</sup>/h.ocupante. Independentemente dos quartos pertencerem a uma habitação familiar ou a um empreendimento turístico, o valor é o mesmo.

Por sua vez, as exigências que o RECS apresenta em relação ao caudal de ar novo são as indicadas na Tabela 19. Para o caso presente, o valor exigido é de 16 m<sup>3</sup>/h.ocupante, observando-se assim uma redução acentuada da exigência comparativamente à anterior regulamentação.

**Tabela 19 - Caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devido à ocupação [10]**

Tipo de atividade	Taxa de metabolismo dos ocupantes - M (met)	Exemplos de tipo de espaço	Caudal de ar novo [m <sup>3</sup> /(hora.pessoa)]
Sono	0,8	Quartos, Dormitórios e similares	16
Descanso	1,0	Salas de repouso, Salas de espera, Salas de conferências, Auditórios e similares, Bibliotecas.	20
Sedentária	1,2	Escritórios, Gabinetes, Secretarias, Salas de aula, Cinemas, Salas de espetáculo, Salas de Refeições, Lojas e similares, Museus e galerias, Salas de convívio, Salas de atividade de estabelecimentos de geriatria e similares.	24
		Salas de jardim de infância e pré-escolar e Salas de creche.	28
Moderada	1,75 (1,4 a 2,0)	Laboratórios, Ateliers, Salas de Desenho e Trabalhos Oficiais, Cafés, Bares, Salas de Jogos e similares.	35
Ligeiramente Alta	2,5 (2,0 a 3,0)	Pistas de dança, Salas em ginásios, Salas de ballet e similares	49
Alta	5,0 (3,0 a 9,0)	Salas de musculação, Salas em ginásios e pavilhões desportivos e similares	98

Considerando o valor de uma renovação por hora, obtido na perspetiva de não ser ultrapassado o limiar máximo da concentração de CO<sub>2</sub> de acordo com o RECS, o caudal correspondente para cada quarto é o que se indica na Tabela 20.

**Tabela 20 - Caudal de ar novo para 1,0 R<sub>ph</sub>**

Volume Quarto [m <sup>3</sup> ]	Renovações [1/hora]	Caudal de Ar [m <sup>3</sup> /hora]	Caudal de Ar [m <sup>3</sup> /(hora.ocupante)]
174,10	1,00	174,10	21,76

Como é possível observar pela Tabela 20, o caudal de ar novo que deve ser introduzido no compartimento não é suficiente face ao valor mínimo estipulado pelo antigo regulamento, o RSECE, mas já satisfaz a exigência do atual regulamento, o RECS.

Tendo em conta os resultados obtidos, para efeitos de manutenção da qualidade do ar dentro dos parâmetros da atual regulamentação, a taxa de renovação deverá ter o valor mínimo de uma renovação por hora. O caudal correspondente a esta taxa, que toma o valor de 174,10 m<sup>3</sup>/h, seria assim o valor de base para dimensionamento de um sistema de ventilação a instalar no edifício. Este sistema, cujo tipo e projeto de instalação saem fora do âmbito do presente trabalho, deverá ser acionado no período de ocupação e debitar nos quartos, em regime permanente, o caudal correspondente a uma renovação por hora.

Fora do período de ocupação, entre as 07:00 e as 18:00 horas, o sistema de ventilação será desligado e o edifício de casernas será ventilado naturalmente. Para o estudo do comportamento térmico é assim importante obter uma estimativa da taxa de ventilação obtida pelos processos naturais da ação do vento e diferença térmica. Esta estimativa foi efetuada de forma simples através

da metodologia expedita que constava na anterior regulamentação do comportamento térmico de edifícios (RCCTE). Apesar de já não ser esta a metodologia da atual regulamentação térmica (REH), nem de estar prevista a sua aplicação para um edifício de serviços, considera-se neste trabalho suficientes as aproximações utilizadas pela anterior metodologia para efetuar a respetiva estimativa. O facto da envolvente do edifício se assemelhar, em termos de tipo e dimensões dos envidraçados, à de um edifício de habitação, reforça a plausibilidade desta hipótese.

De acordo com a anterior regulamentação, um dos fatores de que depende a taxa de ventilação é a classe de exposição do edifício, a qual é obtida a partir da Tabela 21.

**Tabela 21 - Classes de exposição ao vento das fachadas do edifício [11]**

Altura acima do solo	Região A			Região B		
	I	II	III	I	II	III
Menor que 10 m .....	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3
De 10 m a 18 m .....	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4
De 18 m a 28 m .....	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4
Superior a 28 m .....	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 4	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 4

Devido à sua localização – Leiria – este edifício encontra-se na Região A, sendo que a Região B engloba as Regiões Autónomas dos Açores e Madeira, assim como as localidades que se encontrem numa faixa de 5 quilómetros de largura ao longo da costa ou então se a sua localização se situar a uma altitude superior a 600 metros.

Relativamente ao tipo de rugosidade do terreno, atendendo a que o edifício se encontra dentro de uma área urbana, considera-se uma rugosidade do tipo I. Para uma rugosidade do tipo I e uma altura acima do solo inferior a 10 metros, retira-se da Tabela 21 uma classe de exposição 1 para o edifício.

Considerando uma caixilharia sem classificação e sem caixa de estore, e a existência de dispositivos de admissão na fachada, dado que foram observadas aberturas nas paredes exteriores conforme referido anteriormente, a Tabela 22 que se apresenta, retirada do RCCTE, determina a consideração de uma taxa de renovação do ar de  $0,8h^{-1}$ .

**Tabela 22 - Valores convencionais de  $R_{ph}$  (em  $h^{-1}$ ) para edifícios de habitação [11]**

Classe de exposição	Dispositivos de admissão na fachada	Permeabilidade ao ar das caixilarias (de acordo com a norma EN 12207)								Edifícios conformes com a NP 1037-1
		Sem classificação		Classe 1		Classe 2		Classe 3		
		Caixa de estore		Caixa de estore		Caixa de estore		Caixa de estore		
		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	
1	Sim	0,90	0,80	0,85	0,75	0,80	0,70	0,75	0,65	0,60
	Não	1,00	0,90	0,95	0,85	0,90	0,80	0,85	0,75	
2	Sim	0,95	0,85	0,90	0,80	0,85	0,75	0,80	0,70	
	Não	1,05	0,95	1,00	0,90	0,95	0,85	0,90	0,80	
3	Sim	1,00	0,90	0,95	0,85	0,90	0,80	0,85	0,75	
	Não	1,10	1,00	1,05	0,95	1,00	0,90	0,95	0,85	
4	Sim	1,05	0,95	1,00	0,90	0,95	0,85	0,90	0,80	
	Não	1,15	1,05	1,10	1,00	1,05	0,95	1,00	0,90	

Assim, de acordo com as considerações feitas, relativamente às necessidades de ventilação para manutenção da qualidade do ar e às condições de ventilação natural decorrentes das condições de exposição e tipo de envolvente do edifício, o estudo do comportamento térmico e energético dos compartimentos dos quartos será efetuado para as taxas de ventilação e horários de ocorrência que se indicam na Tabela 23.

**Tabela 23 - Horário de funcionamento e  $R_{ph}$  fornecidas pelo sistema de ventilação mecânica**

	Período	Ocupantes [Pessoas]	Renovações de Ar [1/Hora]
<b>Início</b>	01:00	8	1,0
<b>Fim</b>	07:00		
<b>Início</b>	08:00	0	0,80
<b>Fim</b>	17:00		
<b>Início</b>	18:00	8	1,0
<b>Fim</b>	00:00		

#### 4.4. Estudo Térmico

Numa primeira fase, o estudo recaiu sobre a obtenção das necessidades energéticas para as características construtivas atuais do edifício. Após esta fase, para cada elemento construtivo fez-se o estudo das necessidades para várias espessuras de isolamento térmico. Para cada espessura de isolamento foi efetuado um estudo a nível de custos, de investimento e exploração, e consequente determinação do período de retorno respetivo. Numa fase posterior, em que todos os períodos de retorno foram obtidos, determinou-se qual seria a melhor relação (período de retorno)/(poupança energética) para cada tipo de isolamento e desta forma culminar na solução ótima de reabilitação. Por último, e com a obtenção da solução ótima, foi possível determinar as necessidades energéticas anuais que o edifício de caserna necessita.

Para este estudo foi aplicado o valor das renovações de ar por hora obtido na secção anterior. Como o quarto é o compartimento que corresponde à utilização principal deste edifício, foi em relação a este tipo de compartimento que o estudo teve maior incidência.

#### 4.4.1. Renovações de Ar – Cobertura

Um aspeto importante para determinar corretamente o valor das necessidades energéticas num compartimento é o fluxo de ar entre as várias zonas e o exterior. Devido às características construtivas da cobertura, esta permite que haja um valor elevado de ventilação e portanto a temperatura no interior desta irá ser muito próxima da temperatura exterior. Desta forma, as características de ventilação da cobertura serão marcadamente diferentes das dos compartimentos dos quartos, pelo que devem ser estimada de forma diferente. A consequência de tal facto foi a criação de dois horários no *EnergyPlus®*, ao invés de apenas um, para o funcionamento da ventilação. Um horário para regular exclusivamente as renovações de ar por hora da cobertura e outros para regular as dos restantes compartimentos, conforme definido anteriormente.

Para estimar o número de renovações de ar do desvão da cobertura de forma a esta apresentar um comportamento térmico compatível com a hipótese de espaço fortemente ventilado, foi efetuado um estudo de sensibilidade do comportamento térmico do desvão da cobertura em função do número de renovações de ar imposto. Para tal executaram-se várias simulações de forma a observar a variação da temperatura interior do desvão com o número de renovações por hora e ser possível identificar o nível que este parâmetro deve atingir para que o desvão da cobertura possa ser considerado francamente ventilado. Os dias escolhidos para efetuar esta verificação foram os dias 17 de Janeiro e 11 de Agosto e o dia seguinte a cada um deles. Estes dias correspondem aos dias do ano com temperatura mais baixa e mais alta, respetivamente. Na Figura 28 e Figura 29 mostram-se os resultados das simulações.

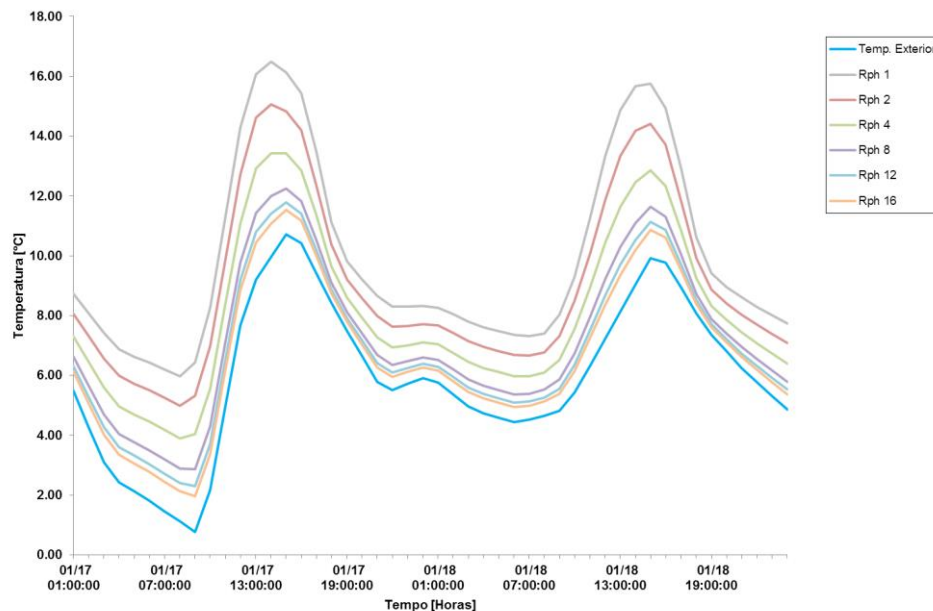
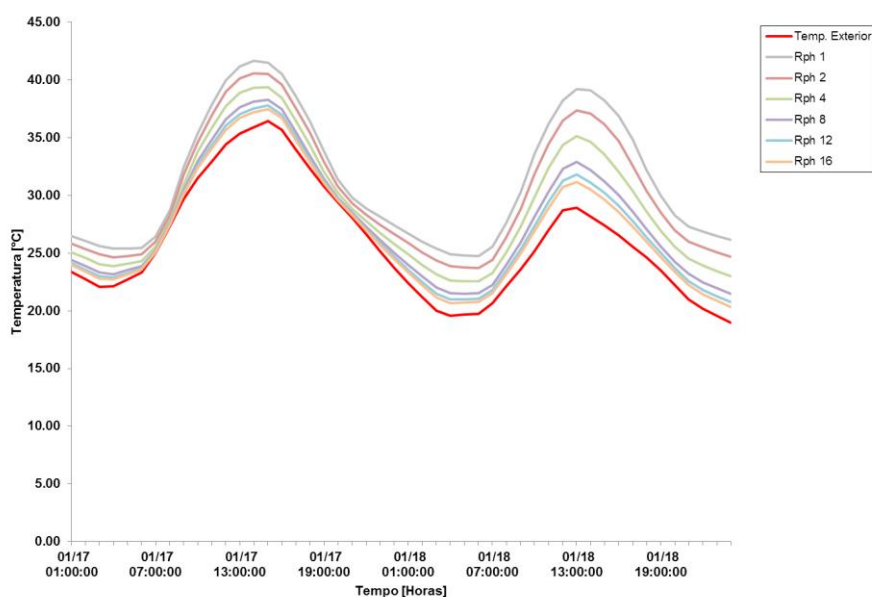


Figura 28 - Temperaturas ao longo de dois dias na Estação de Aquecimento



**Figura 29 - Temperaturas ao longo de dois dias na Estação de Arrefecimento**

Através da Figura 28 e Figura 29 é possível constatar que a partir das 8 renovações por hora as temperaturas no interior da cobertura aproximam-se da temperatura exterior, sendo que para valores superiores de renovações as alterações nas temperaturas interiores são menores. Por este motivo, o valor que foi considerado para a ventilação da cobertura foi de 8 renovações por hora. Determinado o número de renovações por hora da cobertura, foi então possível criar o horário que determinasse este caudal de ar, como se apresenta na Tabela 24.

**Tabela 24 - Horário estipulado para a Cobertura**

	Início	Fim	Número de Renovações [1/hora]
<b>Renovação Cobertura</b>	Dia Completo		8

#### **4.4.2. Termostato – *Thermostat***

Esta função de controlo do *EnergyPlus®* foi utilizada para a obtenção das necessidades energéticas para as estações de aquecimento e de arrefecimento. Basicamente, a função consiste em definir as temperaturas do ar interior (*setpoints*) abaixo ou acima das quais o programa toma determinadas ações. Assim, no caso da estação de aquecimento, a temperatura definida consiste no valor abaixo do qual é fornecida a energia necessária para repor a temperatura do ar interior nesse nível de temperatura definido. Ao invés, na estação de arrefecimento, a temperatura definida neste campo do *EnergyPlus®* consiste no valor acima do qual é fornecida energia para repor a temperatura do ar interior no nível estabelecido. O fornecimento de energia quer na estação de aquecimento quer

na estação de arrefecimento é realizado por um equipamento virtual, que tem um funcionamento ideal, ou seja, com uma capacidade infinita de reagir às solicitações energéticas sempre que a função *termostato* assim o determina.

#### 4.4.2.1. Horário para Estação de Aquecimento – *Heating Setpoint Schedule*

Para a estação de aquecimento considerou-se que o *setpoint* em que o equipamento inicia o seu funcionamento é 20°C, sendo que este é o valor fixado para o período de ocupação do quarto, enquanto para o período em que não há a presença de ocupantes no compartimento admitiu-se que o *setpoint* poderia ser descido para 16°C. Para uma melhor perceção deste funcionamento a Tabela 25 planifica este horário.

**Tabela 25 - Horário para a Estação de Aquecimento**

	Segunda-Feira a Sexta-Feira		Sábado e Domingo		
Início	01:00	20°C	16°C	01:00	Início
Fim	07:00				
Início	08:00	16°C		00:00	Fim
Fim	17:00				
Início	18:00	20°C			
Fim	00:00				

#### 4.4.2.2. Horário para Estação de Arrefecimento – *Cooling Setpoint Schedule*

Para a estação de arrefecimento o *setpoint* considerado em que se inicia o funcionamento do equipamento é 25°C, sendo que este é o valor definido para o período de ocupação do quarto, enquanto para o período em que não há a presença de ocupantes no compartimento admitiu-se que este *setpoint* poderia ser elevado para 30°C. A Tabela 26 representa este horário.

**Tabela 26 - Horário para a Estação de Arrefecimento**

	Segunda-Feira a Sexta-Feira		Sábado e Domingo		
Início	01:00	25°C	30°C	01:00	Início
Fim	07:00				
Início	08:00	30°C		00:00	Fim
Fim	17:00				
Início	18:00	25°C			
Fim	00:00				



#### 4.4.3. Análise dos Resultados para a Solução Construtiva Original

As zonas térmicas escolhidas para o estudo térmico são a zona térmica 2 e zona térmica 9, que se localizam no primeiro piso e no segundo piso respetivamente, para as quais foi realizado a análise do seu comportamento para as estações de aquecimento e arrefecimento.

##### 4.4.3.1. Coeficientes de Transmissão Térmica Máximos

Um dos parâmetros que permite avaliar se um edifício cumpre os requisitos mínimos de qualidade térmica para poder ser objeto de verificação regulamentar, é o valor do coeficiente de transmissão térmica dos vários elementos construtivos através dos quais ocorram trocas de calor. De facto, o regulamento apresenta valores limites para este parâmetro que não podem ser excedidos, sob pena de o edifício ficar excluído da verificação regulamentar por apresentar uma qualidade térmica inferior à mínima admissível. Desta forma, o confronto dos coeficientes de transmissão térmica dos elementos do edifício com os valores máximos permitidos constitui uma forma expedita de, sem recorrer à metodologia geral de cálculo do regulamento, verificar se o nível de qualidade térmica das soluções construtivas é admissível do ponto de vista regulamentar. Assim, para a situação original fez-se uma comparação entre os coeficientes de transmissão térmica dos elementos construtivos existentes e os coeficientes de transmissão térmica máximos estipulados pelo RECS.

Com o conhecimento dos materiais que constituem os vários elementos construtivos, foi então possível determinar as condutâncias térmicas e os respetivos coeficientes de transmissão térmica dos elementos da envolvente exterior e interior, que se listam na Tabela 27.

**Tabela 27 - Condutâncias Térmicas e Coeficientes de Transmissão Térmica para os vários elementos construtivos**

Elementos	Kp (W/m <sup>2</sup> .°C)	U (W/m <sup>2</sup> .°C)
Parede exterior 500 mm	2.19	1.60
Parede exterior 400 mm	2.73	1.87
Parede interior 250 mm	1.61	1.26
Parede interior 150 mm	1.59	1.25
Pavimento intermédio	6.68	3.45
Teto do último piso	7.44	3.65
Pavimento térreo	7.72	2.95

A determinação dos coeficientes de transmissão térmica exigiu, para além dos valores das condutâncias térmicas dos elementos, os valores das resistências térmicas superficiais interior e exterior, os quais se indicam na Tabela 28.

**Tabela 28 - Valores para as Resistências Térmicas Superficiais**

Fluxo		Resistência térmica Superficial ( $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ )	
		Exterior (Rse)	Interior (Rsi)
Horizontal		0.04	0.13
Vertical	Ascendente	0.04	0.1
	Descendente	0.04	0.17

Relativamente aos coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos, as exigências estipuladas no RECS dependem da zona climática onde está implantado o edifício e da posição do elemento na envolvente, que pode ser horizontal, no caso de coberturas ou pavimentos, ou vertical, no caso de paredes. Na Tabela 29, retirada do RECS, indicam-se os valores máximos regulamentares dos coeficientes de transmissão térmica dos elementos opacos exteriores [12]. Os elementos envidraçados não ficam sujeitos a este tipo de verificação.

**Tabela 29 - Coeficientes de transmissão térmica máximo admissível,  $U_{\text{max}}$ , para a envolvente opaca exterior de edifícios de comércio e serviços [12], em  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$** 

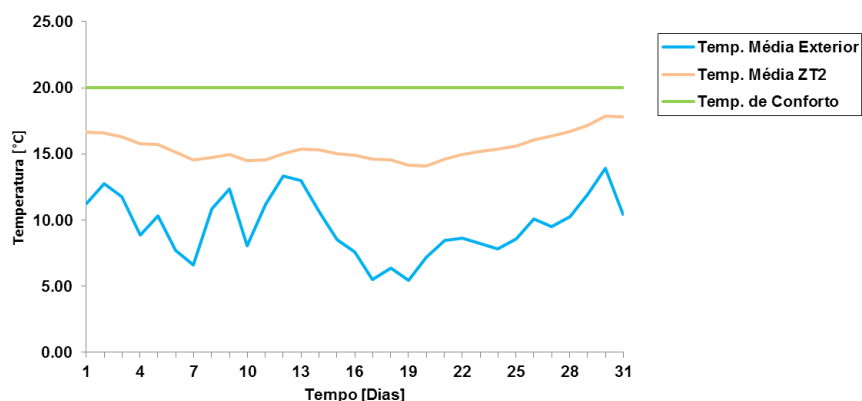
Elemento em zona corrente da envolvente	Zona climática		
	I1	I2	I3
Elemento opaco vertical	1,75	1,60	1,45
Elemento opaco horizontal	1,25	1,00	0,90

Como referido anteriormente, o edifício em questão encontra-se na zona climática I1, o que implica que os valores dos coeficientes de transmissão térmica máximos são  $1,75 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  e  $1,25 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  para elementos verticais e horizontais, respetivamente. Por comparação destes valores máximos com valores reais da Tabela 27, verifica-se que as paredes exteriores de 400 mm ultrapassam o valor máximo estipulado e o mesmo acontece com o teto do último piso, admitindo que este se encontra em contacto com um ambiente muito próximo do exterior.

#### 4.4.3.2. Primeiro Piso

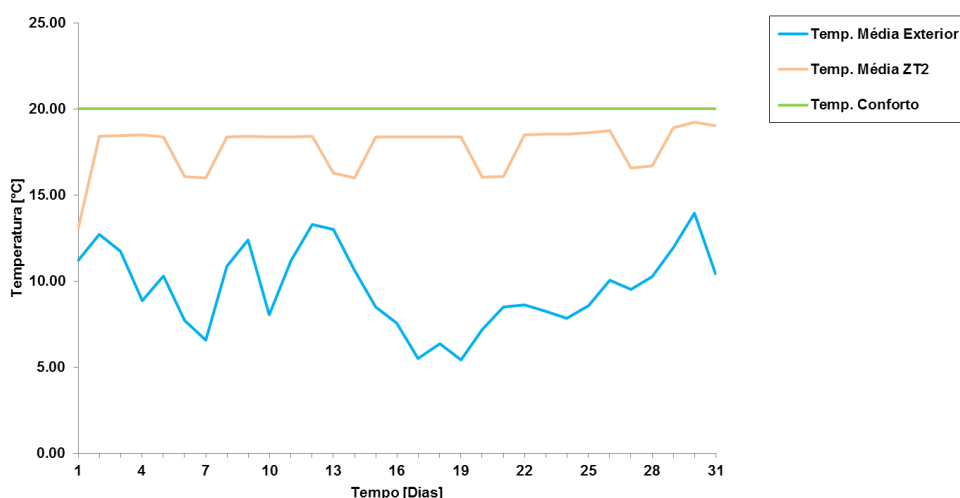
A Figura 30 diz respeito a um compartimento do primeiro piso, correspondendo à zona térmica 2. O comportamento térmico desta zona é representativo do comportamento térmico do conjunto dos quartos deste piso, razão pela qual foi selecionada neste estudo.

Na estação de aquecimento, foi efetuada uma análise da variação da temperatura média diária do ar interior da zona térmica 2 para o mês com as temperaturas mais baixas, que no caso presente correspondeu ao mês de Janeiro. Esta simulação ocorreu sem a influência de equipamentos/sistemas de climatização, ou seja, correspondeu a uma análise em regime livre.



**Figura 30 - Distribuição das Temperaturas médias diárias para o mês de Janeiro**

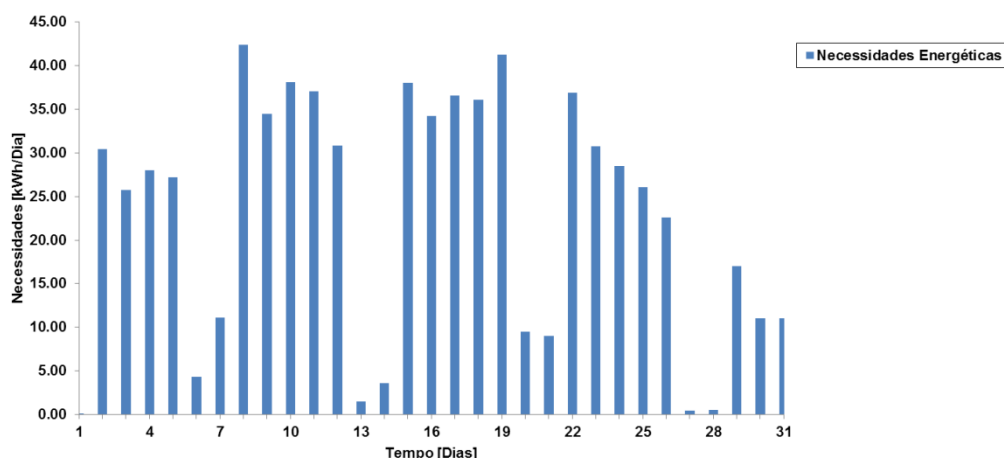
A Figura 30 permite comprovar que a temperatura média no interior do compartimento é sempre superior à temperatura média exterior, mas com a particularidade de nunca atingir os valores da temperatura de conforto, isto é, o valor estipulado de 20°C. Efetuou-se também uma análise, cujos resultados se mostram na Figura 31, em que se contemplou a utilização de um sistema de climatização para que o patamar de conforto fosse respeitado.



**Figura 31 - Distribuição de Temperaturas médias diárias para o mês de Janeiro com sistema de climatização**

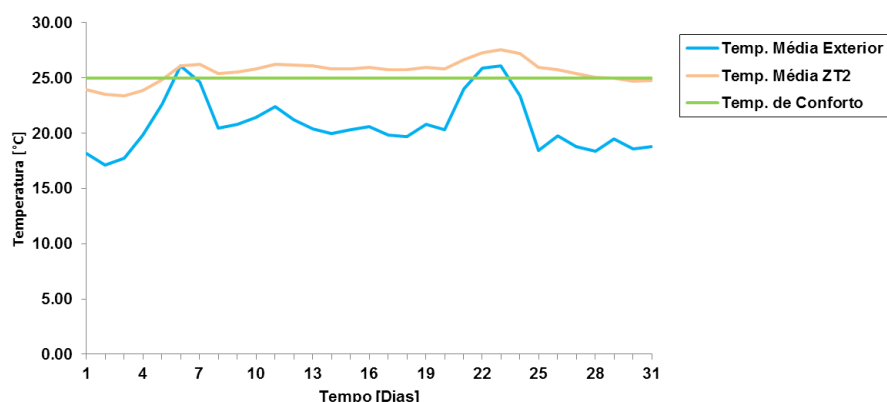
A Figura 31 apresenta a temperatura média do ar interior afetada pelo funcionamento do sistema de climatização. É possível verificar que a temperatura média interior não atinge o patamar dos 20°C. Este comportamento é devido ao facto de ser permitido, nas horas em que não há ocupação do quarto, que a temperatura desça até aos 16°C. Naturalmente que, se fossem representadas as temperaturas instantâneas, verificar-se-ia, no período de ocupação, a temperatura limite de 20°C sempre que a tendência natural fosse para a ocorrência de uma temperatura inferior.

No que diz respeito ao fornecimento de energia ao longo do mês, este varia sensivelmente entre os valores de 0 kWh/Dia e os 42,5 kWh/Dia, como é visível através da Figura 32. Outro aspeto visível na Figura 32 é que para períodos em que a temperatura média exterior é mais elevada, o fornecimento de energia sofre uma diminuição e o contrário também se observa.



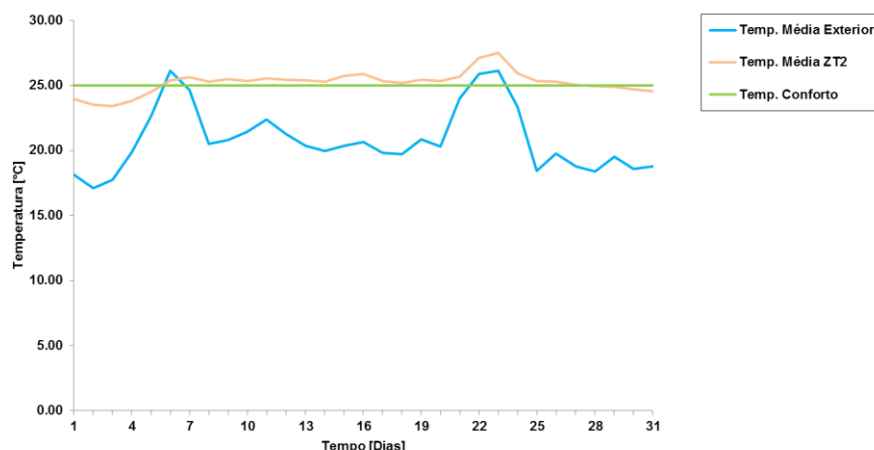
**Figura 32 - Necessidades Energéticas para o mês de Janeiro**

Relativamente à estação de arrefecimento, os pressupostos adotados foram em tudo idênticos aos utilizados para a estação de aquecimento. A Figura 33 apresenta o comportamento da temperatura no mês de Julho, que é o mês mais quente da estação de arrefecimento. Um aspeto que se pode observar é a temperatura média interior do compartimento encontrar-se acima da temperatura exterior praticamente durante todo este período, embora ficando próxima do valor da temperatura de conforto, fixada em 25°C. De notar que existe um dia em que a temperatura exterior iguala a interior, o que é possível dado tratarem-se de temperaturas médias diárias.



**Figura 33 - Distribuição das Temperaturas médias diárias para o mês de Julho**

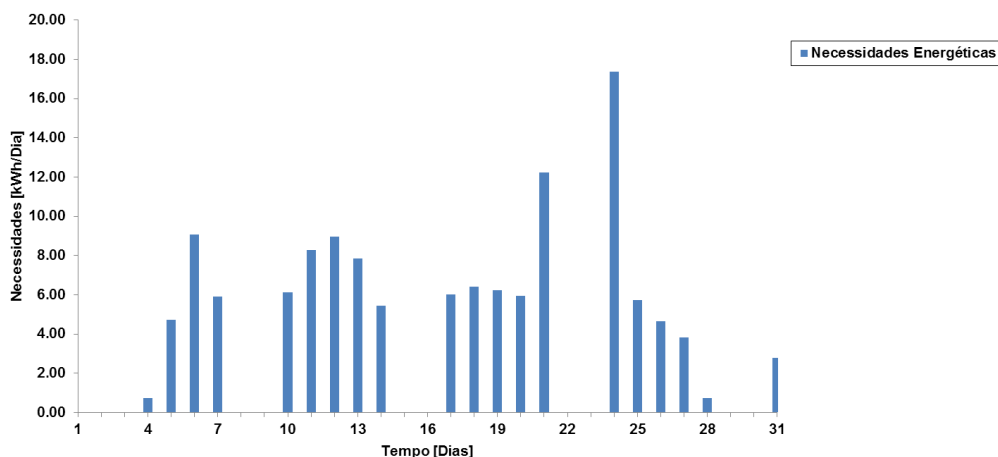
Assim como para a estação de aquecimento, também se realizou na estação de arrefecimento uma análise com o sistema de climatização incorporado na simulação.



**Figura 34 - Distribuição de Temperaturas médias diárias para o mês de Julho com sistema de climatização**

Na Figura 34 pode-se observar que o comportamento da temperatura interior, ao ser condicionado pelo sistema de climatização, é ligeiramente diferente do original. Isto ocorre pois os valores obtidos para a temperatura média interior, para a situação em regime livre, encontram-se relativamente próximos do patamar de conforto, levando a pequenas diferenças quando esta é afetada pelo sistema de climatização.

No que toca às necessidades energéticas para a estação de arrefecimento, estas tomam valores que variam em geral entre os 0 kWh/Dia e 10 kWh/Dia, destacando-se apenas um valor bastante superior a este último, da ordem dos 17 kWh/Dia, devido a um aumento significativo da temperatura média exterior.

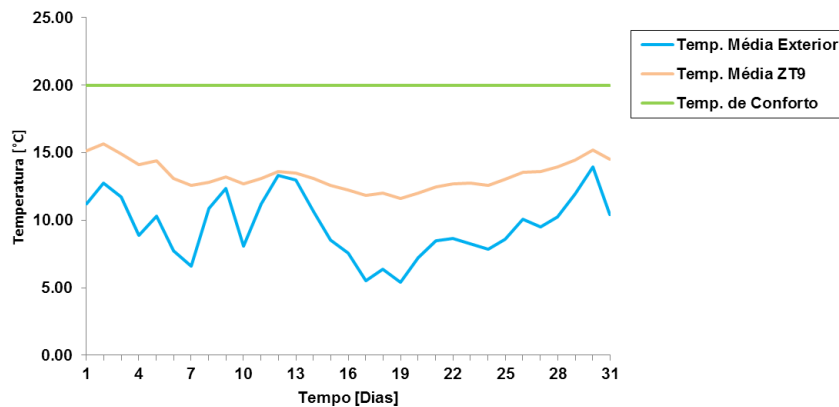


**Figura 35 - Necessidades Energéticas para o mês de Julho**

#### 4.4.3.3. Segundo Piso

No que diz respeito ao segundo piso, foi também selecionado um compartimento representativo do comportamento térmico dos quartos deste piso, tendo-se selecionado para o efeito o quarto correspondente à zona térmica 9.

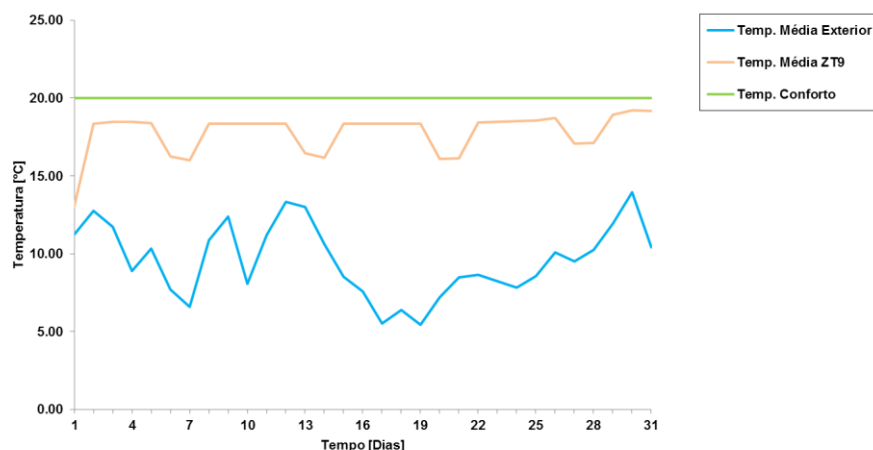
O primeiro resultado a ser apresentado, na Figura 36, corresponde à distribuição das temperaturas para a estação de aquecimento para o mês de Janeiro e sem a inclusão do sistema de climatização.



**Figura 36 - Distribuição das Temperaturas médias diárias para o mês de Janeiro**

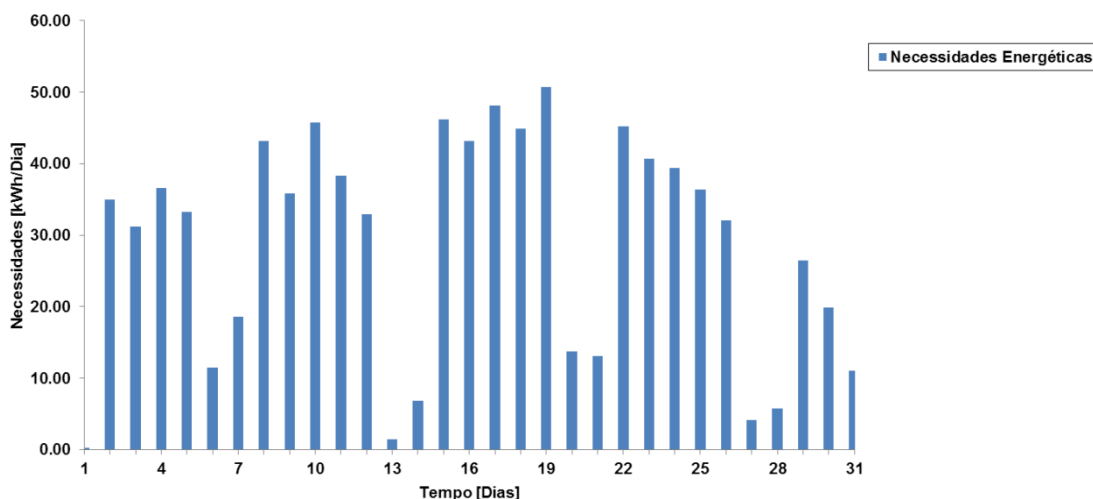
À semelhança do primeiro piso, é possível constatar que a variação da temperatura média interior do quarto é sempre superior à temperatura exterior e ao mesmo tempo encontra-se abaixo da temperatura de conforto, ou seja, do patamar de 20°C. Um aspeto que também deve ser assinalado é a relação entre as temperaturas verificadas no primeiro e segundo piso, observando-se, por comparação com a Figura 30, que as temperaturas médias do segundo piso são inferiores às do primeiro, o que se justifica pela influência que a cobertura tem nas trocas de calor.

Na Figura 37 estão apresentadas as temperaturas médias do compartimento para o mês de Janeiro com o efeito do sistema de climatização. O comportamento é em tudo idêntico ao do compartimento do primeiro piso, sendo apenas de salientar que a variação de temperaturas entre a situação sem sistema e com sistema de climatização é menor, pois a temperatura interior no segundo piso é inferior à do primeiro. A temperatura média interior, seja para a situação em regime livre seja para a situação com o sistema de climatização, é menor no segundo que no primeiro, devido às maiores trocas de calor através da cobertura.



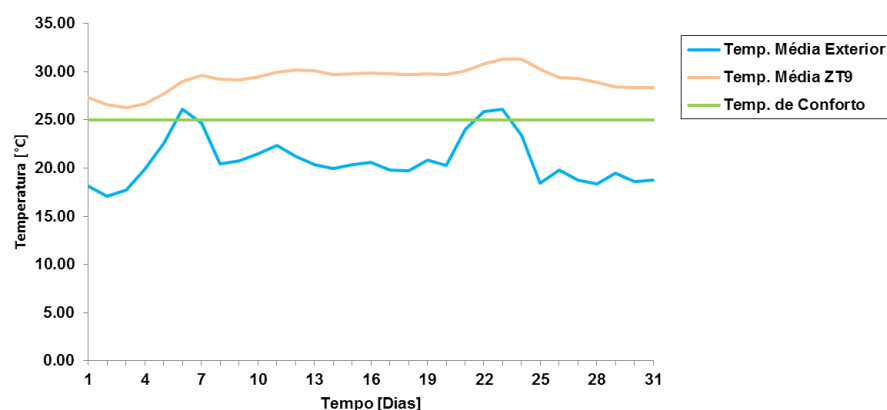
**Figura 37 - Distribuição de Temperaturas médias diárias para o mês de Janeiro com sistema de climatização**

Relativamente às necessidades energéticas, mostradas na Figura 38, os seus valores para este compartimento situam-se entre valores muito próximos de 0 kWh/Dia e 50 kWh/Dia, valor este que é superior ao obtido para o piso inferior, que resulta do acréscimo de perdas de calor pela cobertura.



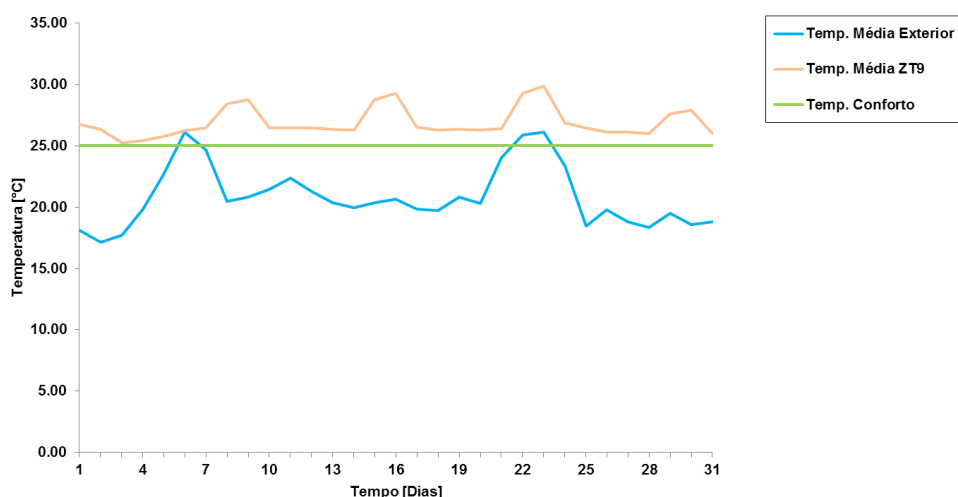
**Figura 38 - Necessidades Energéticas para o mês de Janeiro**

Ao analisar a estação de arrefecimento – Figura 39 – é visível que as temperaturas médias interiores são sempre superiores às suas homólogas do exterior, situando-se também sempre acima do patamar de conforto.



**Figura 39 - Distribuição das Temperaturas médias diárias para o mês de Julho**

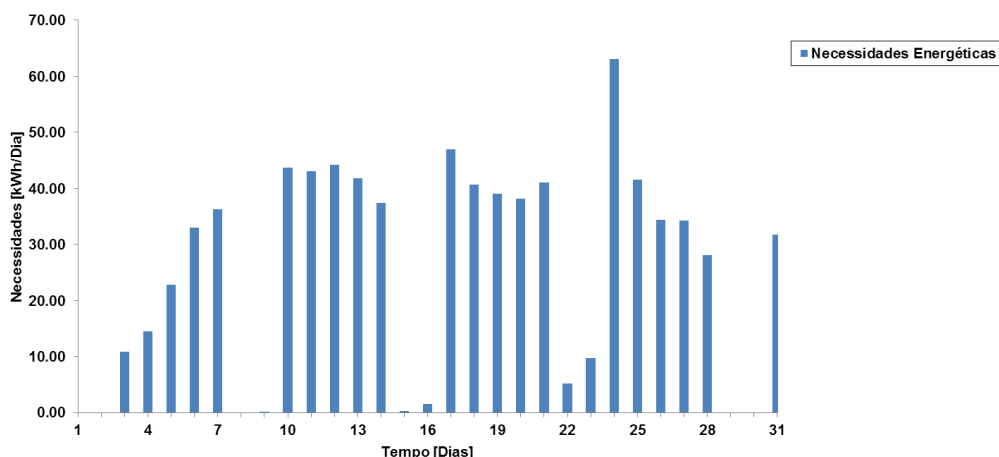
Na Figura 40 já é possível observar que com o sistema de climatização a temperatura interior regista valores mais próximos do patamar de conforto durante os períodos de ocupação. Fora destes períodos, em que não há ocupação, as temperaturas podem atingir valores máximos até 30°C, de acordo com os *setpoints* definidos na estação de arrefecimento.



**Figura 40 - Distribuição de Temperaturas médias afetadas pelo sistema de climatização**

Comparativamente com o compartimento do piso inferior, o compartimento deste piso necessita de maior energia de arrefecimento, pois a diferença da temperatura interior para o patamar de conforto é superior, consequência do facto de estar em contacto com a cobertura, o que conduz a um regime superior de funcionamento do sistema. O intervalo médio dentro do qual variam estas necessidades, visível na Figura 41, encontra-se entre 0 e 40 kWh/Dia, um valor aproximadamente quatro vezes superior ao valor análogo para o compartimento do primeiro piso.





**Figura 41 - Necessidades Energéticas para o mês de Julho**

#### 4.4.3.4. Necessidades Energéticas Totais

Para o período correspondente à estação de aquecimento os resultados obtidos, em kWh/Ano para as zonas térmicas correspondentes aos quartos, estão indicados na Tabela 30.

**Tabela 30 - Necessidades Energéticas (kWh/Ano) — Estação de Aquecimento**

Primeiro Piso	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4	ZT16
	3107,74	2994,31	2982,73	4573,14	20450,58
Segundo Piso	ZT8	ZT9	ZT10	ZT11	ZT19
	3266,21	3225,41	3196,90	5138,56	24684,00

Relativamente às necessidades energéticas para a estação de arrefecimento, estas encontram-se indicadas na Tabela 31, igualmente em kWh/Ano.

**Tabela 31 - Necessidades Energéticas (kWh/Ano) — Estação de Arrefecimento**

Primeiro Piso	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4	ZT16
	390,41	376,75	386,29	404,54	1768,88
Segundo Piso	ZT8	ZT9	ZT10	ZT11	ZT19
	1007,59	914,38	922,33	968,45	3014,59

#### 4.4.4. Soluções de Reabilitação Térmica/Energética

No que diz respeito à reabilitação térmica, esta traduziu-se pelo isolamento térmico da envolvente, tendo apenas sido objeto de reabilitação as superfícies opacas, ou seja, a área de envidraçados não foi tida em conta neste estudo. Os elementos das superfícies opacas que foram alvo de estudo no que respeita à sua reabilitação térmica foram os tetos das zonas térmicas que se encontram em contacto com a cobertura, as paredes exteriores e os pavimentos das zonas térmicas

que se encontram em contacto com o solo. Nas próximas secções serão apresentadas as várias soluções que foram adotadas para a reabilitação.

#### 4.4.4.1. Isolamento Térmico de Coberturas

As coberturas dividem-se em dois tipos, as coberturas em terraço e as coberturas inclinadas, sendo que para cada tipo existem várias opções possíveis para a sua reabilitação. Neste caso de estudo trata-se de uma cobertura inclinada, com uma estrutura de ripado de madeira.

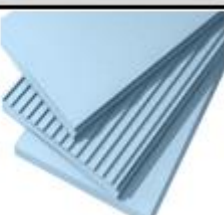
No caso de coberturas inclinadas, a solução de reabilitação depende do tipo de aproveitamento do desvão, ou seja, se este não for habitado a reabilitação é executada através da colocação do isolamento térmico sobre a laje do teto, enquanto se for habitado o isolamento terá de ser colocado na cobertura do telhado. No caso do edifício de caserna, este espaço encontra-se desocupado e portanto adotou-se a primeira solução de execução da reabilitação. Na Figura 42 é apresentado um tipo de solução possível para este caso.



Figura 42 - Exemplo de uma solução para a cobertura em causa [13]

Neste estudo, o material de isolamento que se assumiu para a reabilitação foi o EPS, tendo a escolha recaído sobre esta opção pela facilidade de colocação deste material, dado que é fornecido sob a forma de painéis rígidos e também devido ao seu reduzido custo por metro quadrado, quando comparado com outras opções. Na Tabela 32, estão indicadas as características do EPS que foram introduzidas no *EnergyPlus*®.

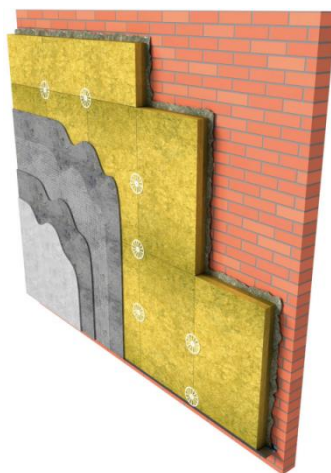
Tabela 32 - Características do EPS introduzidas na modelação

EPS		
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	20	
$\lambda$ (W/m <sup>0</sup> C)	0.034	
$C$ (J/Kg. <sup>0</sup> C)	1550	

#### 4.4.4.2. Isolamento Térmico de Paredes Exteriores

Relativamente às opções para reabilitação térmica através de aplicação de isolamento nas paredes exteriores, podem-se agrupar-las em três tipos, sendo que o isolamento pode ser colocado pelo exterior da parede, pode ser colocado pelo interior da parede e por último, no caso de paredes duplas, pode ser aplicado por injeção na caixa-de-ar entre os panos de parede. Como no caso deste edifício não existem paredes duplas, apenas restam as opções de isolamento pelo exterior ou interior. Entre estas duas opções, a escolhida foi a colocação do isolamento térmico pelo exterior, pois atendendo às características dos quartos, apresentados na secção 3.8, é possível com esta solução manter a área útil interior e ao mesmo tempo eliminar eventuais pontes térmicas.

Determinada a forma como o isolamento é colocado, segue-se a escolha do sistema. O sistema escolhido para realizar o isolamento térmico das paredes pelo exterior foi o sistema ETICS (External Thermal Insulation Composite Systems) [14]. É um sistema que é adequado para a reabilitação de edifícios, pois não requer a demolição ou alterações significativas das paredes e, tratando-se este de um edifício de geometria regular e sem elementos decorativos ou zonas de geometria complexa, é uma ótima solução para ser aplicada. No entanto, é uma solução que apresenta uma resistência mecânica relativamente baixa e por isso é um sistema suscetível de sofrer danos causados por agentes exteriores. No entanto, atendendo ao ambiente em que se insere – uma Unidade militar – não é expectável que esta instalação sofra este tipo de danos. Como o próprio nome indica, o ETICS é composto por vários materiais, como é visível pela Figura 43, sendo que um dos constituintes é o material isolante, tendo o material escolhido para este estudo sido a Lã-de-Rocha.



**Figura 43 - Várias camadas constituintes do sistema ETICS [13]**

Relativamente às propriedades do material escolhido – Lã-de-Rocha –, as introduzidas no programa foram as que se listam na Tabela 33.

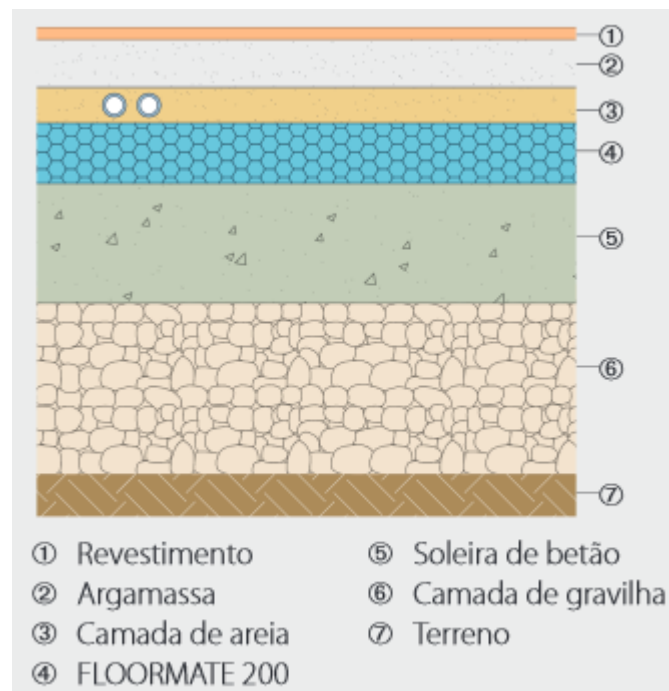
**Tabela 33 - Características da Lã-de-Rocha introduzidas na modelação**

Lã de Rocha		
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	100	
$\lambda$ (W/m <sup>0</sup> C)	0.036	
C (J/Kg. <sup>0</sup> C)	735	

#### 4.4.4.3. Isolamento térmico de Laje Térrea

Por fim, o isolamento da laje térrea pode ser executado de duas formas distintas, sendo que a primeira consiste em colocar o isolamento pelo exterior, ou seja, sobre o terreno, enquanto que a segunda consiste em colocar o isolamento pelo interior, ou seja, sobre a laje. Em relação à primeira, tem de haver a preocupação de o terreno se encontrar bem compactado e de criar uma superfície que seja regular e contínua em toda a superfície de forma a que esta possa receber o isolamento. Na segunda hipótese, em que o isolamento é colocado acima da laje, a camada de regularização pode não ser necessária e a colocação do isolamento não necessita de qualquer tipo de fixação.

No caso presente a única hipótese viável é a segunda, com a colocação do isolamento por cima da laje térrea. A instalação desta solução está representada na Figura 44.




**Figura 44 - Esquema de instalação do isolamento na laje térrea [15]**

Com esta escolha surge a preocupação relativamente à resistência à compressão, pois o isolamento deve suportar os vários carregamentos que poderão ocorrer durante a utilização do compartimento. Atendendo a esta preocupação o material escolhido foi o XPS, pois a sua resistência à compressão mínima tem início nos 200kPa, classe utilizada em pavimentos residenciais e comerciais, e atinge valores de 700kPa para locais com utilizações especiais ou circulação de veículos pesados [15].

Assim como os outros isolamentos utilizados nos restantes elementos, também para o XPS foram introduzidas as suas características no programa, as quais se indicam na Tabela 34.

**Tabela 34 - Características do XPS introduzidas na modelação**

XPS		
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	33	
$\lambda$ (W/m <sup>0</sup> C)	0.035	
C (J/Kg. <sup>0</sup> C)	1550	

#### **4.4.5. Seleção das Soluções de Reabilitação Térmica**

A escolha da solução de reabilitação para cada um dos tipos de elementos construtivos atrás referidos, consistirá na determinação de um nível de isolamento térmico considerado ótimo à luz de um critério que irá combinar o período de retorno do investimento, necessário para implementar a solução, com a taxa anual de poupança energética que fica associada à solução.

A cada solução de reabilitação, traduzida por um dado nível de isolamento térmico, fica associado um investimento inicial que variará com a espessura e o tipo de materiais adotados. Em contrapartida, essa solução permitirá uma poupança anual, em relação ao estado original, dos custos de exploração relativos à energia despendida para assegurar o conforto térmico. O instante no tempo em que o investimento realizado é compensado pela poupança acumulada obtida com os custos energéticos, denomina-se período de retorno. O período de retorno pode também definir-se como o instante do tempo em que os custos acumulados de exploração do edifício no seu estado original igualam a soma do custo de investimento com os custos acumulados de exploração do edifício no estado reabilitado.

O método do período de retorno é um método de utilização simples e de rápida compreensão, que em períodos de instabilidade económica permite ter um maior controlo nos níveis de investimentos iniciais. No presente estudo foi determinado o período de retorno para cada espessura de cada tipo de isolamento adotado para cada elemento construtivo selecionado, utilizando as considerações que se apresentam a seguir.

#### 4.4.5.1. Custo de Exploração

Nesta avaliação económica das soluções de reabilitação, há dois custos que devem ser tidos em conta – o custo de exploração, relativo às necessidades energéticas, e o custo inicial, correspondente ao investimento da intervenção de reabilitação. Atendendo a que as necessidades energéticas de aquecimento são preponderantes relativamente às necessidades energéticas de aquecimento, são as primeiras que são utilizadas neste estudo para efetuar a avaliação económica das soluções de reabilitação.

Em resultado da intervenção de reabilitação térmica, materializada num incremento do nível de isolamento térmico da envolvente, e portanto num aumento da eficiência energética do edifício, o custo de exploração deste diminui em relação ao valor da situação original, anterior à intervenção. De uma forma geral, o custo de exploração num dado ano  $n$ , relativo à energia necessária para assegurar o conforto térmico, e reportado ao ano de investimento, é calculado através da expressão seguinte:

$$C_{exp,n} = \frac{Q}{\eta} \times \frac{C_{e,n}}{(1 + \alpha)^n} \quad (5)$$

em que,

$C_{exp,n}$  – Custo de Exploração relativo ao ano  $n$  [kWh/Ano];

$Q$  – Necessidades de Energia (aquecimento) Anuais para assegurar o conforto térmico [kWh/Ano];

$\eta$  – Eficiência do equipamento utilizado;

$C_e$  – Custo unitário da Energia para o ano  $n$  [€/kWh];

$\alpha$  – Taxa de Atualização.

Relativamente ao equipamento adotado para o fornecimento de energia aos compartimentos em causa, de forma a serem respeitados os patamares de conforto, adotou-se um sistema de aquecimento obtido por resistência elétrica, cuja eficiência é de 100%. No que toca à taxa de atualização, o valor que se admitiu foi de 3%. Para a determinação do custo da energia para o ano  $n$  foi também considerado o efeito da inflação, através de uma taxa de crescimento anual do preço da energia, para a qual foi adotado um valor de 4%. Assim sendo, este custo da energia, para um dado ano  $n$ , é obtido através da seguinte expressão:

$$C_{e,n} = C \times (1 + \beta)^n \quad (6)$$

em que,

$C$  – Custo unitário de Energia referido ao ano de investimento [€/kWh];

$\beta$  – Taxa de Inflação.

Relativamente ao custo unitário da energia, este foi determinado com base no tarifário que se encontra em vigor desde Janeiro de 2014. Assim, considerando um fornecimento de energia de baixa tensão ( $> 2,3$  kVA) em tarifa simples, tomou-se o valor de 0,1528 €/kWh [16].

#### 4.4.5.2. Custo de Investimento

No que toca ao custo de investimento, este foi obtido através de um gerador de preços [13], em que para cada tipo de isolamento são fornecidos os custos, em €/m<sup>2</sup>, para alguns valores da espessura. De forma a efetuar um estudo mais pormenorizado, considerou-se um número de espessuras maior que o fornecido pelo gerador de preços, sendo que para estes o custo foi obtido por extrapolação a partir dos valores conhecidos. Estes valores serão apresentados, posteriormente, nas respetivas secções onde o cálculo foi efetuado.

#### 4.4.5.3. Período de Retorno

Sabendo o custo de investimento inicial e os custos de exploração que vão acontecendo ao longo do tempo, o custo global, associado à construção original e à construção depois de intervencionada, é obtido a partir das seguintes expressões, respetivamente:

$$C_{global}^{orig} = \sum_{j=1}^N C_{exp,j}^{orig} \quad (7)$$

$$C_{global}^{reab} = I_0 + \sum_{j=1}^N C_{exp,j}^{reab} \quad (8)$$

Pela definição acima apresentada, o período de retorno é o instante  $T$  em que  $C_{global}^{orig} = C_{global}^{reab}$ , ou seja:

$$I_0 = \sum_{j=1}^T \Delta C_{exp,j} \quad (9)$$

em que:

$\Delta C_{exp,n} = C_{exp,n}^{orig} - C_{exp,n}^{reab}$  representa a poupança nos custos de exploração, para o ano  $n$ , obtida com a solução de reabilitação.

Para decidir sobre a escolha da solução de reabilitação térmica a adotar, para cada elemento construtivo, um possível critério seria selecionar a que conduz ao período de retorno mínimo, ou seja, a solução que mais cedo proporciona a recuperação total do investimento. No entanto, um critério apenas deste tipo ignoraria todos os benefícios monetários que ocorreriam depois desse período e que podem condicionar a escolha. Estes benefícios estão naturalmente relacionados com a taxa anual de poupança energética associada a cada solução. A decisão entre uma solução com um pequeno período de retorno e uma poupança energética anual baixa e uma solução com um elevado período de retorno e uma poupança anual elevada pode não ser evidente. Desta forma, o critério para

a determinação da solução ótima baseou-se no valor tomado pela relação entre o período de recuperação e a poupança energética anual:

$$T/P = \frac{\text{Período de retorno}}{\text{Poupança energética anual}} \quad (10)$$

A solução ótima será a que conduzir ao valor mínimo desta relação. Nos pontos seguintes será utilizado este critério, ou pelo menos será tido em conta, para a escolha do nível de isolamento térmico a aplicar nos diferentes elementos construtivos que são alvo de reabilitação.

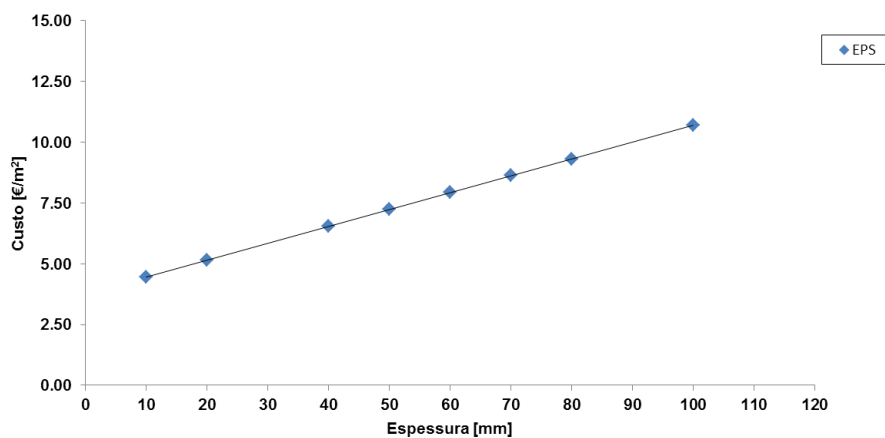
#### 4.4.5.4. Intervenção na Cobertura

Como foi referido anteriormente, o tipo de isolamento escolhido para a cobertura foi o EPS. Para a análise efetuada à cobertura, os valores que se adotaram para a espessura do isolamento foram os que se indicam na Tabela 35.

**Tabela 35 - Espessuras adotadas para estudo – EPS**

EPS Espessura [mm]							
10	20	40	50	60	70	80	100

Os custos relativos às espessuras acima mencionadas foram retirados a partir do gráfico mostrado na Figura 45, construído a partir do gerador de preços já referido.



**Figura 45 - Custos em função da Espessura – EPS**

Para esta solução, a equação da reta que se ajusta aos pontos que relacionam os custos do isolamento com a espessura, assim como os valores dos custos que resultam para as diferentes espessuras, estão indicados na Tabela 36. Nesta tabela também estão indicados os custos para a área total a ser reabilitada por compartimento.



**Tabela 36 - Custos para as várias espessuras – EPS**

EPS		
$y = 0,0696x + 3,752$		
Espessura [mm]	Preço [€/m <sup>2</sup> ]	Preço [€]
10	4,45	201,14
20	5,14	232,61
40	6,54	295,56
50	7,23	327,03
60	7,93	358,50
70	8,62	389,98
80	9,32	421,45
100	10,71	484,40

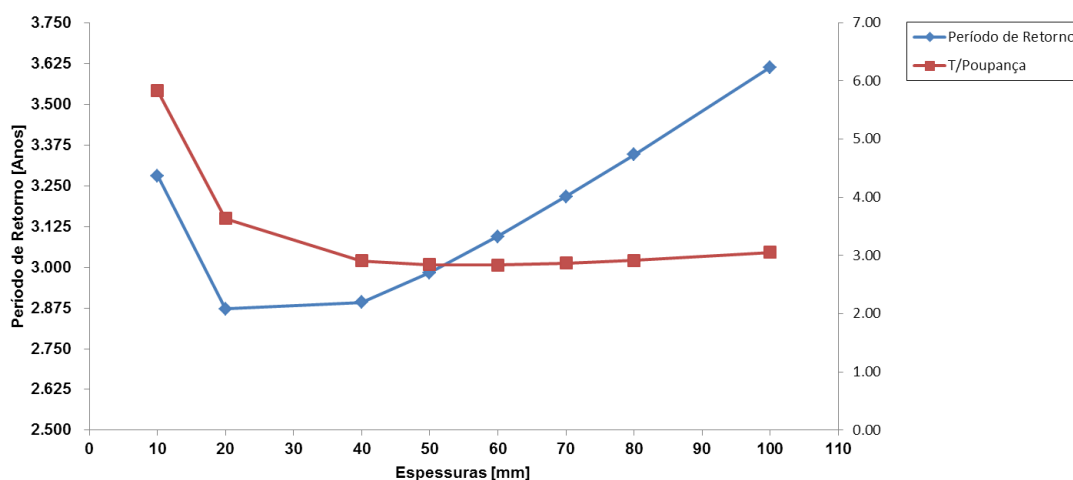
De seguida serão apresentados os resultados para as necessidades energéticas, considerando apenas o isolamento na cobertura, durante a estação de aquecimento, em função da espessura de isolamento adotada, e as respetivas poupanças em relação à situação original.

**Tabela 37 - Necessidades Energéticas e Poupanças – EPS**

Espessura [mm]	Necessidades energéticas [kWh/Ano]	Poupança [kWh/Ano]
10	2662,99	562,42
20	2435,66	786,75
40	2231,80	993,61
50	2176,13	1049,28
60	2135,15	1090,26
70	2103,93	1121,48
80	2079,19	1146,22
100	2042,36	1183,06

Como é possível verificar, a partir dos 60 mm de espessura as diferenças entre as poupanças para duas espessuras sucessivas já são pequenas, ou seja, para espessuras superiores a 60 mm os ganhos em termos de poupanças são pouco significativos.

Para cada uma destas espessuras foram determinados os períodos de retorno correspondentes, os quais foram obtidos através da intersecção das funções de custos acumulados sem e com solução aplicada (equações 7 e 8). Após a determinação dos períodos de retorno para os vários valores de espessura, foi determinada a relação entre o período de retorno e a poupança energética anual, permitindo identificar o valor mínimo desta relação e, consequentemente a espessura ótima de isolamento à luz do critério referido acima. Na Figura 46 representa-se graficamente o período de retorno e a relação entre este período e a poupança, em função da espessura de isolamento. Como se observa, a espessura correspondente ao período de retorno mínimo não coincide com a espessura correspondente ao valor mínimo daquela relação.



**Figura 46 - Períodos de Retorno e Relação Período/Poupança – EPS**

Verifica-se que a espessura a que corresponde o menor período de retorno (2,87 anos) é 20 mm enquanto que a espessura a que corresponde a menor relação entre o período de retorno e a poupança energética é de 60 mm, à qual fica associada, por sua vez, um período de retorno de 3,09 anos. Este facto mostra que o critério do menor período de retorno e da menor relação entre este e a poupança energética conduzem a resultados diferentes.

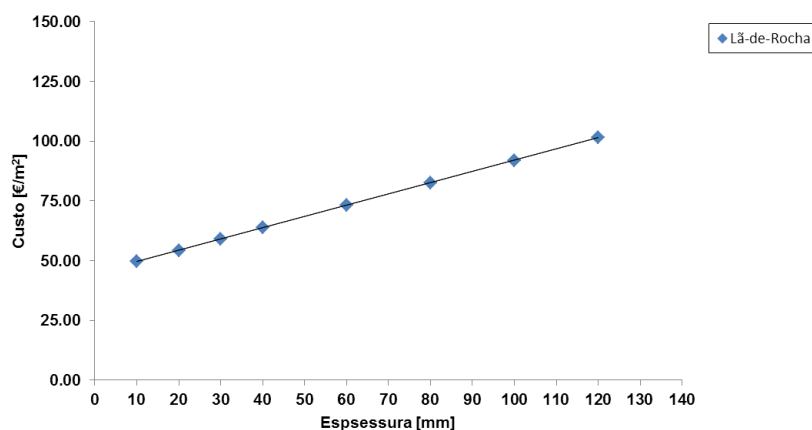
#### 4.4.5.5. Intervenção na Parede Exterior

O tipo de isolamento escolhido para a reabilitação das paredes exteriores foi Lã-de-Rocha. Para a análise efetuada a este elemento construtivo, os valores que se adotaram para a espessura de isolamento foram os que se indicam na Tabela 38.

**Tabela 38 - Espessuras adotadas para o estudo – Lã-de-Rocha**

Espessuras [mm]							
10	20	30	40	60	80	100	120

Para as espessuras adotadas, os custos foram obtidos a partir do gráfico que se mostra na Figura 47.



**Figura 47 - Custos em função da Espessura – Lã-de-Rocha**

Para a Lã-de-Rocha os custos obtidos para as várias espessuras estão indicados na Tabela 39, por metro quadrado e por área total por compartimento a reabilitar, assim como a equação da reta que foi utilizada para tal fim.

**Tabela 39 - Custos para as várias espessuras – Lã-de-Rocha**

Lã-de-Rocha		
$y = 0,4719x + 44,814$		
Espessura (mm)	Preço (€/m²)	Preço (€)
10	49,53	797,48
20	54,25	873,46
30	58,97	949,43
40	63,69	1025,41
60	73,13	1177,36
80	82,57	1329,31
100	92,00	1481,26
120	101,44	1633,22

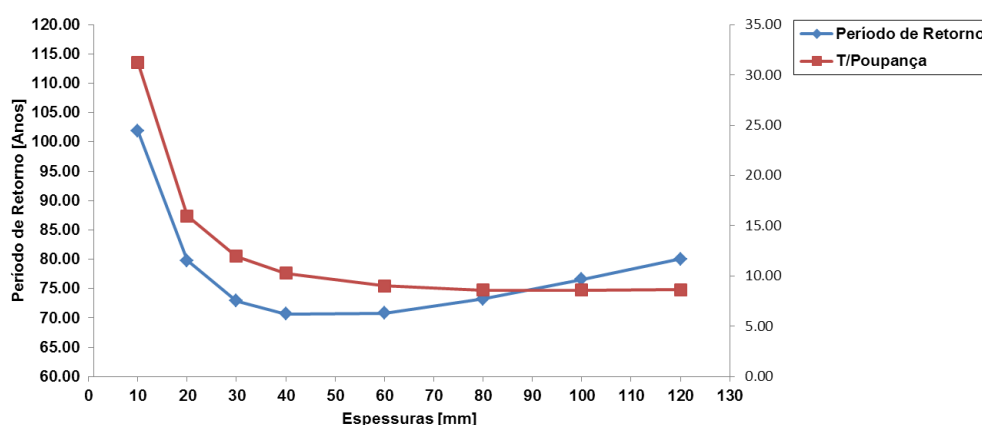
Na Tabela 40 estão indicados os resultados para as necessidades energéticas relativas à estação de aquecimento, obtidas tendo apenas em consideração o isolamento térmico da parede exterior, e as respetivas poupanças em relação à situação original.

**Tabela 40 - Necessidades Energéticas e Poupanças – Lã-de-Rocha**

Espessura [mm]	Necessidades energéticas [kWh/Ano]	Poupança [kWh/Ano]
10	3192,76	32,66
20	3175,52	49,89
30	3164,35	61,06
40	3156,71	68,70
60	3146,74	78,68
80	3140,32	85,10
100	3136,14	89,27
120	3132,65	92,76

A Tabela 40 mostra que a parede exterior não é o elemento construtivo com maior preponderância relativamente às necessidades energéticas, pois independentemente da espessura de isolamento a utilizar na reabilitação deste elemento, as poupanças obtidas são bastante baixas. Uma consequência do facto dos valores das poupanças serem reduzidos será a obtenção de valores para o período de retorno muito altos.

O método para a determinação dos períodos de retorno para as várias espessuras foi idêntico ao utilizado para o EPS na secção anterior. Na Figura 48 apresentam-se os períodos de retorno obtidos para o isolamento de Lã-de-Rocha, assim como a relação entre os períodos e as respectivas poupanças.



**Figura 48 - Períodos de Retorno e Relação Período/Poupança – Lã-de-Rocha**

Para esta situação a melhor relação período de retorno/poupança é para a espessura de 100 mm, à qual corresponde um período de retorno de 76,60 anos. Visto a espessura obtida por este método ser relativamente elevada para ser executada, admitiu-se então que para o isolamento da parede exterior em Lã-de-Rocha a espessura seria determinada pelo menor período de retorno de forma a reaver o investimento no menor tempo possível. Para o menor período de retorno a espessura que lhe corresponde é 40 mm, valor que já se encontra dentro dos parâmetros normais de aplicação para este tipo de isolamento, o qual tem 70,69 anos como período de retorno.

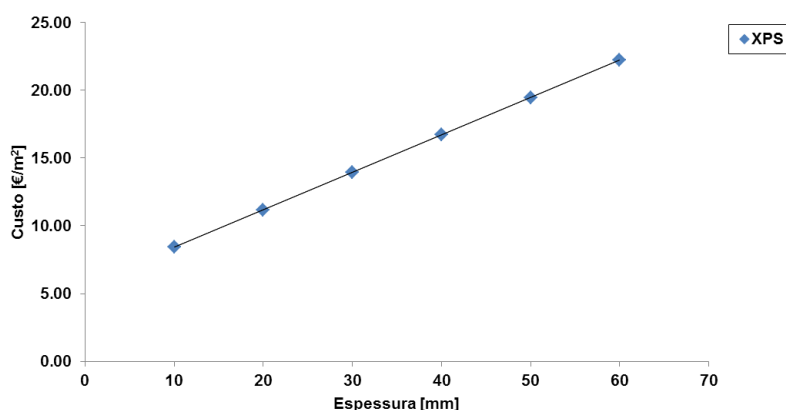
#### 4.4.5.6. Intervenção na Laje Térrea

Para laje térrea o isolamento adotado foi do tipo XPS. As espessuras que se admitiram para efetuar este estudo foram as que se encontram na Tabela 41.

**Tabela 41 - Espessuras adotadas para o estudo – XPS**

Espessura [mm]					
10	20	30	40	50	60

Seguindo a mesma metodologia utilizada para os elementos construtivos anteriores, os custos associados a cada espessura foram obtidos com base no gráfico mostrado na Figura 49.



**Figura 49 - Custos em função da Espessura – XPS**

Os custos obtidos por m<sup>2</sup> e para a totalidade da área por compartimento a intervir, assim como a equação da reta que permite a interpolação destes custos para as várias espessuras de isolamento, estão indicados na Tabela 42.

**Tabela 42 - Custos para as várias espessuras – XPS**

XPS		
$y = 0,276x + 5,67$		
Espessura (mm)	Preço (€/m <sup>2</sup> )	Preço (€)
10	8,43	381,20
20	11,19	506,01
30	13,95	630,82
40	16,71	755,63
50	19,47	880,43
60	22,23	1005,24

Com estes valores de espessuras efetuou-se o estudo de forma a obter as necessidades energéticas para a estação de aquecimento. Desta forma, foi possível determinar as poupanças

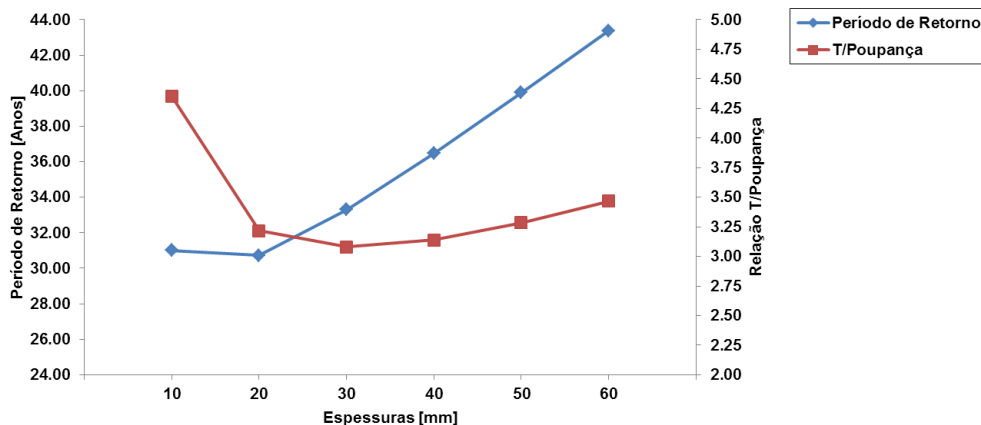
obtidas para cada espessura, em que se tomou a laje térrea como único elemento a ser intervencionado, tal como se procedeu para os outros elementos construtivos. Estes dados encontram-se apresentados na Tabela 43.

**Tabela 43 - Necessidades Energéticas e Poupanças – XPS**

<b>Espessura [mm]</b>	<b>Necessidades energéticas [kWh/Ano]</b>	<b>Poupança [kWh/Ano]</b>
10	2923,14	71,17
20	2898,79	95,52
30	2886,17	108,14
40	2878,12	116,18
50	2872,88	121,43
60	2869,21	125,10

Como é visível na Tabela 43, os níveis de poupança que se obtêm através da reabilitação da laje térrea são superiores aos obtidos pela parede exterior, significando que ocorre uma maior troca de calor entre o compartimento e o solo que entre o compartimento e o exterior. Para a gama de espessuras adotada para esta análise é de referir que a partir dos 40 mm de espessura o aumento que ocorre no valor da poupança é baixo, sendo que a nível económico não se torna viável aplicar espessuras superiores.

Em relação aos períodos de retorno determinados para o isolamento da laje térrea, estes encontram-se numa gama de valores entre os 30 e os 44 anos para a menor e maior espessura analisada, respetivamente. Esta variação do período de retorno é visível na Figura 50.



**Figura 50 - Períodos de Retorno e Relação Período/Poupança – XPS**

Relativamente aos períodos de retorno é visível que quanto menor a espessura menor será o período de retorno, devendo-se isto ao facto de que para uma menor espessura o custo de investimento inicial para a reabilitação é menor. Se for feita a relação com a poupança para cada espessura chega-se à conclusão que o menor período de retorno não corresponde à opção mais rentável, ou seja, os ganhos que se obtêm através da poupança são inferiores quando comparados

com outras espessuras. No que toca à opção mais rentável, esta corresponde à espessura de 30 mm, pois é a que conduz a uma menor relação entre o período de retorno e a poupança, sendo que para esta espessura está associado um período de retorno de 33,30 anos. Por razões construtivas, que se prendem com a resistência mecânica do isolamento térmico, que deve ser adequada ao tipo de utilização do suporte, que neste caso é um piso de circulação, adota-se para a laje térrea uma espessura de isolamento de 40 mm.

#### 4.4.6. Solução Ótima

Após as análises efetuadas, em que se considerou que apenas um tipo de elemento era intervencionado, importa agora efetuar o estudo com os três tipos de elementos construtivos intervencionados. A combinação de espessuras utilizadas neste estudo para os diferentes elementos da envolvente foi a que resultou das análises efetuadas para cada um deles. Pressupõe-se que a utilização das espessuras de isolamento obtidas nas análises individuais produz a combinação de espessuras que conduz à melhor solução de reabilitação térmica para a envolvente onde esses elementos estão presentes. Assim, a combinação de espessuras utilizada para a análise do efeito do conjunto dos elementos no compartimento das zonas térmicas é a que se apresenta na Tabela 44.

**Tabela 44 - Combinação de Espessuras para a Solução Ótima**

	<b>Espessura [mm]</b>
<b>Cobertura [EPS]</b>	60
<b>Parede Exterior [Lã-de-Rocha]</b>	40
<b>Laje Térrea [XPS]</b>	40

Ao efetuar-se as análises para a estação de aquecimento e arrefecimento considerando esta combinação de espessuras, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 45 e Tabela 46, respetivamente.

**Tabela 45 - Necessidades Energéticas após reabilitação (kWh/Ano) — Estação de Aquecimento**

<b>Primeiro Piso</b>	<b>ZT1</b>	<b>ZT2</b>	<b>ZT3</b>	<b>ZT4</b>	<b>ZT16</b>
	1748,51	1661,76	1645,67	2521,59	11294,19
<b>Segundo Piso</b>	<b>ZT8</b>	<b>ZT9</b>	<b>ZT10</b>	<b>ZT11</b>	<b>ZT19</b>
	1957,96	1894,21	1856,83	2861,38	14386,43

**Tabela 46 - Necessidades Energéticas após reabilitação (kWh/Ano) — Estação de Arrefecimento**

<b>Primeiro Piso</b>	<b>ZT1</b>	<b>ZT2</b>	<b>ZT3</b>	<b>ZT4</b>	<b>ZT16</b>
	281,73	269,73	274,94	314,38	1495,22
<b>Segundo Piso</b>	<b>ZT8</b>	<b>ZT9</b>	<b>ZT10</b>	<b>ZT11</b>	<b>ZT19</b>
	726,86	719,76	728,61	817,32	2541,87

Como é possível verificar ocorre uma redução significativa das necessidades energéticas para a estação de aquecimento em comparação com a situação original – Tabela 30. Relativamente à estação de arrefecimento o comportamento das necessidades energéticas é semelhante ao da estação de aquecimento, mas neste caso a redução observada em relação à situação original é menos significativa.

#### 4.4.6.1. Coeficientes de Transmissão Térmica de Referência

Um aspeto que merece ser alvo de análise, como foi também destacado para a situação original, é o enquadramento, face às exigências regulamentares, dos coeficientes de transmissão térmica dos elementos após serem intervencionados. Na Tabela 47 encontram-se indicados os valores das condutâncias térmicas e dos coeficientes de transmissão térmica para os elementos reabilitados.

**Tabela 47 - Condutâncias Térmicas e Coeficientes de Transmissão Térmica para os vários elementos construtivos reabilitados**

Elementos	Kp (W/m <sup>2</sup> .°C)	U (W/m <sup>2</sup> .°C)
Parede exterior 500 mm	0,64	0,58
Parede exterior 400 mm	0,68	0,61
Teto do último piso	0,53	0,49
Pavimento térreo	0,83	0,70

Estes coeficientes foram calculados da mesma forma que os obtidos na Tabela 27, ou seja, com base nas resistências térmicas superficiais da Tabela 28 mas desta vez com a inclusão das respetivas espessuras de isolamento para cada elemento construtivo. É de notar que ocorre uma redução significativa dos valores destes coeficientes após a reabilitação, o que vem confirmar a melhoria do comportamento a nível térmico em relação aos resultados obtidos anteriormente. Neste ponto é também de referir que, relativamente aos valores máximos estipulados pelo RECS – Tabela 29 – a parede exterior de 400 mm, que ultrapassava o limite admissível, após a reabilitação apresenta uma diminuição do valor do seu coeficiente de transmissão térmica em cerca de três vezes, passando desta forma a respeitar o limite. Relativamente aos elementos horizontais, cujos coeficientes de transmissão térmica ultrapassavam todos o valor limite de 1,25 W/m<sup>2</sup>.°C, ao serem reabilitados passam a apresentar valores para os seus coeficientes que respeitam os limites estabelecidos. De referir que este estudo apenas toma em conta os parâmetros base dos regulamentos, e não os métodos de cálculo das necessidades energéticas, pois o objetivo é, neste campo, adquirir uma melhor perceção da qualidade térmica da reabilitação para os vários elementos construtivos.

O RECS, para além de estipular valores máximos para os coeficientes de transmissão térmica [12], também indica valores de referência para os mesmos, ou seja, valores indicativos de uma qualidade térmica desejável. Estes valores encontram-se indicados na Tabela 48.



**Tabela 48 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência,  $U_{ref}$ , de elementos opacos e de vãos envidraçados para edifícios de comércio e serviços [12], em  $W/m^2 \cdot ^\circ C$**

	Zona Climática		
Portugal Continental			
Zona corrente da envolvente	I1	I2	I3
Elementos opacos verticais exteriores ou interiores	0,70	0,60	0,50
Elementos opacos horizontais exteriores ou interiores	0,50	0,45	0,40

Como é visível através da Tabela 48, os valores de referência são significativamente menores que os valores máximos estipulados. Quando se compara os valores dos coeficientes de transmissão térmica obtidos para os elementos reabilitados, a conclusão a que se chega é que satisfazem também os valores de referência. Relativamente aos elementos verticais, estes apresentam valores de 0,61 e 0,58  $W/m^2 \cdot ^\circ C$  para a parede de 400 mm e 500 mm, respetivamente, sendo, assim, o correspondente coeficiente de transmissão térmica de referência, com o valor de 0,70  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ , respeitado. No que toca aos elementos horizontais, estes têm como valor de referência 0,50  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ . Assim, verifica-se que para o teto do último piso o valor do coeficiente de transmissão térmica é inferior mas praticamente coincidente com o de referência, enquanto o do pavimento térreo fica acima do valor de referência. No entanto, em rigor, um pavimento em contacto com o solo é um elemento da envolvente sem requisitos, pelo que não pode ser colocado ao mesmo nível que um elemento exterior ou interior para efeitos de comparação com o valor de referência do coeficiente de transmissão térmica.

#### 4.4.6.2. Análise Energética Global

Nas secções 4.4.3.4 e 4.4.6 foram determinadas as necessidades energéticas para a estação aquecimento e arrefecimento, tanto para a situação original como para a reabilitada, respetivamente. Nesta análise global não se pode somar as parcelas das necessidades de aquecimento com as de arrefecimento, pois estas necessidades podem ser fornecidas através de diferentes formas de energia e com equipamentos de diferentes rendimentos. Para que seja possível somar as duas parcelas é necessário proceder à conversão das duas parcelas para energia primária, que tem como unidades toneladas equivalentes de petróleo (tep), e é conseguida através da seguinte expressão:

$$E_{total} = \frac{N_{aquec}}{\eta_{aquec}} \times F_{pu,aquec} + \frac{N_{arref}}{\eta_{arref}} \times F_{pu,arref} \quad (11)$$

Neste estudo consideraram-se equipamentos diferentes para as duas estações convencionais. Para a estação convencional de aquecimento admitiu-se um fornecimento de energia obtido por resistência elétrica, a que corresponde um rendimento igual a 1. Para a estação convencional de arrefecimento adotou-se um equipamento do tipo máquina frigorífica com um rendimento de 3 [17].

Dado que em ambos os casos é utilizada a mesma forma de energia (eletricidade), a conversão para energia primária não é necessária, sendo apenas de considerar os respetivos rendimentos.

Na Tabela 49 encontram-se indicados os valores das necessidades energéticas com uso de equipamentos para a situação original.

**Tabela 49 - Necessidades energéticas de aquecimento, arrefecimento e totais (kWh/Ano) para situação original**

		ZT1	ZT2	ZT3	ZT4	ZT16
<b>Estação Convencional Aquecimento</b>	<b>N<sub>aquec</sub></b>	3107,74	2994,31	2982,73	4573,14	20450,58
	<b>N<sub>aquec</sub> (η=1)</b>	3107,74	2994,31	2982,73	4573,14	20450,58
		<b>ZT8</b>	<b>ZT9</b>	<b>ZT10</b>	<b>ZT11</b>	<b>ZT19</b>
	<b>N<sub>aquec</sub></b>	3266,21	3225,41	3196,9	5138,56	24684,00
	<b>N<sub>aquec</sub> (η=1)</b>	3266,21	3225,41	3196,9	5138,56	24684,00
		ZT1	ZT2	ZT3	ZT4	ZT16
<b>Estação Convencional Arrefecimento</b>	<b>N<sub>arref</sub></b>	390,41	376,75	386,29	404,54	1768,88
	<b>N<sub>arref</sub> (η=3)</b>	130,14	125,58	128,76	134,85	589,63
		<b>ZT8</b>	<b>ZT9</b>	<b>ZT10</b>	<b>ZT11</b>	<b>ZT19</b>
	<b>N<sub>arref</sub></b>	1007,59	914,38	922,33	968,45	3014,59
	<b>N<sub>arref</sub> (η=3)</b>	335,86	304,79	307,44	322,82	1004,86
		ZT1	ZT2	ZT3	ZT4	ZT16
<b>Total</b>		3237,88	3119,89	3111,49	4707,99	21040,21
		ZT8	ZT9	ZT10	ZT11	ZT19
<b>Total</b>		3602,07	3530,20	3504,34	5461,38	25688,86

Os valores totais das necessidades da Tabela 49 podem ser comparados com os que se indicam na Tabela 50, correspondentes à situação reabilitada.

**Tabela 50 - Necessidades energéticas de aquecimento, arrefecimento e Totais (kWh/ano) para situação reabilitada**

		ZT1	ZT2	ZT3	ZT4	ZT16
<b>Estação Convencional Aquecimento</b>	<b>N<sub>aquec</sub></b>	1748,51	1661,76	1645,67	2521,59	11294,26
	<b>N<sub>aquec</sub> (η=1)</b>	1748,51	1661,76	1645,67	2521,59	11294,26
		<b>ZT8</b>	<b>ZT9</b>	<b>ZT10</b>	<b>ZT11</b>	<b>ZT19</b>
	<b>N<sub>aquec</sub></b>	1957,96	1894,21	1856,83	2861,38	14386,43
	<b>N<sub>aquec</sub> (η=1)</b>	1957,96	1894,21	1856,83	2861,38	14386,43
		ZT1	ZT2	ZT3	ZT4	ZT16
<b>Estação Convencional Arrefecimento</b>	<b>N<sub>arref</sub></b>	281,73	269,73	274,94	314,38	1495,22
	<b>N<sub>arref</sub> (η=3)</b>	93,91	89,91	91,65	104,79	498,41
		<b>ZT8</b>	<b>ZT9</b>	<b>ZT10</b>	<b>ZT11</b>	<b>ZT19</b>
	<b>N<sub>arref</sub></b>	726,86	719,76	728,61	817,32	2541,87
	<b>N<sub>arref</sub> (η=3)</b>	242,29	239,92	242,87	272,44	847,29
		ZT1	ZT2	ZT3	ZT4	ZT16
<b>Total</b>		1842,42	1751,67	1737,32	2626,38	11792,67
		ZT8	ZT9	ZT10	ZT11	ZT19
<b>Total</b>		2200,25	2134,13	2099,70	3133,82	15233,72

Como é visível, o comportamento das necessidades energéticas manteve-se o mesmo após a reabilitação. Na situação original os compartimentos do segundo piso eram os que apresentavam

maior valor de necessidades energéticas. Ao passar-se para a situação reabilitada as necessidades energéticas continuam a ser superiores às do primeiro piso. Este comportamento deve-se ao facto de o quarto do segundo piso, apesar de ser igual ao do primeiro, ficar sob a cobertura. Apesar da cobertura ter sido bastante isolada, com 60 mm de EPS, as perdas através dela para o exterior, na estação de aquecimento, continuam, na situação reabilitada, a ser superiores às perdas pela laje térrea nos quartos do primeiro piso, onde se observam as condições de conforto, para os quartos do segundo piso, onde estas condições de conforto térmico devem ser igualmente mantidas. Um aspeto que também é visível refere-se aos valores das necessidades energéticas para as zonas ZT4 e ZT11, os quais são sempre superiores aos valores dos restantes compartimentos dos respetivos pisos. Este facto acontece pois as zonas ZT4 e ZT11 representam compartimentos que têm três elementos construtivos em contacto com o exterior, sendo estes duas paredes exteriores e pavimento térreo e teto do último piso para a ZT4 e ZT11, respetivamente, o que origina maiores trocas de calor com o exterior. Relativamente aos valores totais das necessidades, é visível que ocorre uma diminuição significativa em todas as zonas térmicas.

Verifica-se também que o peso das necessidades energéticas de aquecimento no valor global é incomparavelmente maior que o das necessidades de arrefecimento, o que valida a hipótese de ter sido considerado da determinação das soluções de reabilitação apenas a parcela do aquecimento, pois esta é a mais condicionante do cálculo.

Por fim, e revendo o estudo desde o início pode-se concluir que as soluções de reabilitação que se obtiveram permitem diminuir significativamente, em cerca de 40%, as necessidades energéticas, e consequentemente conduzem a grandes poupanças a este nível relativamente à situação original.



## Capítulo V

### 5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Na presente dissertação foi desenvolvido um estudo sobre o comportamento térmico e energético de um edifício pertencente a uma unidade do tipo CANIFA e apresentadas propostas para a sua reabilitação. O edifício sobre o qual este estudo incidiu foi um edifício de caserna do Regimento de Artilharia nº4. Atendendo à especificidade da utilização deste edifício foi também realizada uma análise de sensibilidade relativa à qualidade do ar no interior dos quartos. Com o objetivo principal de determinar as soluções de reabilitação térmica mas adequadas, foi simulada a aplicação de isolamentos térmicos com várias espessuras ao caso de estudo, sendo que a sua otimização foi realizada em função do período de retorno, envolvendo os custos de exploração e de investimento, e da poupança energética que resultam dessa aplicação.

Os edifícios militares que se inserem no tipo CANIFA representam a maioria dos edifícios militares que estão atualmente ao serviço em Portugal. Devido ao facto de este tipo de edifícios ter sido projetado e construído num período em que o conforto térmico, os consumos energéticos e a qualidade do ar não faziam parte das regulamentações a cumprir, resulta que este tipo de edifícios se encontra atualmente muito desatualizado em relação a esta matéria, e portanto uma reabilitação a nível energético destes edifícios assume um carácter prioritário.

Este estudo foi dividido em três etapas diferentes. A primeira consistiu na realização de uma análise de sensibilidade relativa à qualidade do ar para um quarto típico do edifício de caserna; a segunda etapa correspondeu à análise térmica e energética do edifício com as características térmicas atuais; por fim, a terceira e última etapa consistiu na determinação da solução considerada ótima para a reabilitação do edifício de caserna. O estudo térmico e energético foi efetuado em regime dinâmico, tendo-se utilizado para o efeito um programa muito reconhecido pela comunidade científica para a realização deste tipo de estudos – o programa *EnergyPlus*<sup>®</sup>. A modelação foi efetuada com o auxílio deste programa foi de modo a que representasse o melhor possível, tanto geometricamente como a nível das suas propriedades, o edifício de caserna que foi objeto de estudo.

Para a primeira fase do estudo foi necessário considerar a taxa de produção de CO<sub>2</sub> relativa aos ocupantes, consoante o tipo de atividade realizada. Com esta taxa determinada, e adotando uma concentração de CO<sub>2</sub> constante para o exterior, foram realizadas simulações com várias taxas de renovação para determinar a variação da concentração de CO<sub>2</sub> do ambiente interior e avaliar a conformidade dos valores obtidos face ao estabelecido na regulamentação. Este estudo permitiu obter a taxa de renovação de ar necessária para manter a qualidade do ar no interior dos quartos, durante o período de ocupação, dentro dos padrões regulamentares. Esta taxa foi utilizada nesse período para o estudo térmico e energético, no pressuposto da existência de um sistema de ventilação que operasse nesse horário e desligasse no restante período do dia. Fora do período de ocupação, admitiu-se que a ventilação se processava naturalmente a uma taxa que foi obtida de forma expedita a partir do anterior regulamento térmico – RCCTE.

Para a segunda fase do estudo foram determinados os coeficientes de transmissão térmica dos para os vários elementos construtivos com as suas características atuais e avaliada a sua conformidade com os requisitos regulamentares. Tendo-se concluído pela sua não conformidade, o passo seguinte na realização de um estudo térmico e energético em regime dinâmico para as zonas térmicas do edifício de caserna consideradas representativas, mais concretamente os quartos. Os resultados obtidos, para além de permitirem evidenciar comportamento térmico no tempo, que se confirmou abaixo do exigido e por razões de conforto, constituíram uma referência de comparação, em termos energéticos, para os resultados obtidos, na fase seguinte, com as soluções de isolamento térmico aplicadas.

Por fim, a terceira fase incidiu na seleção do tipo de isolamento e espessuras a aplicar nos vários elementos construtivos identificados como condicionantes do desempenho térmico do edifício: paredes exteriores, piso térreo e tetos da cobertura. Para as paredes exteriores o tipo de isolamento adotado foi a Lã-de-Rocha inserida num sistema de ETICS; para a laje térrea adotou-se o XPS enquanto para o teto em contacto com o desvão da cobertura admitiu-se o EPS. Para selecionar a espessura de isolamento a adotar como solução de reabilitação, ou pelo menos servir de critério ao processo de escolha, foi utilizada uma metodologia baseada na maximização da poupança para o menor período de retorno. Para aplicação desta metodologia foram calculadas as necessidades energéticas – apenas as de aquecimento, por serem as mais condicionantes –, para cada espessura de isolamento, e os respetivos custos de exploração. Estes custos, juntamente com os custos de investimentos associados à quantidade de material e aplicação, permitiram determinar o período de retorno. As poupanças energéticas, por sua vez, foram obtidas simplesmente por subtração das necessidades energéticas com o isolamento aplicado, das necessidades energéticas relativas à construção original. A aplicação da metodologia referida conduziu às espessuras de 60 mm para os tetos da cobertura, 40 mm para as paredes exteriores e 40 mm para a laje térrea.

Com a solução de reabilitação determinada, realizou-se o mesmo tipo de análises das efetuadas para a situação original, tendo-se obtido, num primeiro tempo, os valores dos coeficientes de transmissão térmica dos elementos construtivos reabilitados e comparado com os valores máximos e de referência estipulados na regulamentação em vigor. Este passo permitiu concluir que os elementos construtivos com as soluções de isolamento encontradas cumprem todos eles os requisitos mínimos regulamentares e que os elementos verticais apresentam um nível de qualidade térmica bastante superior ao de referência. Por fim, obtiveram-se os valores relativos às necessidades energéticas das zonas térmicas, representativas de quartos, para a situação reabilitada, tanto na estação de aquecimento como na estação de arrefecimento. Foi possível concluir que a situação reabilitada conduz a uma redução significativa das necessidades de aquecimento relativamente à situação original. No que toca às necessidades de arrefecimento também ocorre uma diminuição das necessidades energéticas, embora menos significativa. É também de referir que relativamente às necessidades energéticas totais, que foram obtidas com dados equipamentos de

climatização, houve uma diminuição na ordem dos 40% para a situação reabilitadas quando comparadas com a situação original.

Concluindo, a reabilitação proposta introduz melhorias significativas no desempenho térmico e energético do edifício de caserna, pois permite a obtenção de um valor de poupança energética anual elevado e, conseqüentemente, uma grande melhoria no que diz respeito às condições de conforto com eficiência energética. Os resultados obtidos neste estudo vão de encontro aos que foram obtidos na dissertação realizada por J. Cabrito [18] do Instituto Superior Técnico.

No que toca a desenvolvimentos futuros, e na sequência do estudo realizado nesta dissertação, seria de considerar a possibilidade de estender este estudo aos restantes edifícios tipo CANIFA, visto eles apresentarem características muito idênticas, sejam elas a nível de elementos construtivos como de configuração dos próprios edifícios. Outro aspeto que faria também sentido abordar seria a influência dos vãos envidraçados no desempenho térmico e energético do edifício e a proposta de soluções de melhoria deste desempenho. Seria também interessante um estudo que considerasse outros tipos de equipamentos para o fornecimento de energia, como é o caso de equipamentos capazes de produzir na mesma unidade este conseguir produzir frio e calor, como é o exemplo da bomba de calor.

Os edifícios militares constituem um sector do parque edificado que, pela sua antiguidade, se encontram muito desatualizados face às exigências de eficiência energética que vigoram atualmente. Por esta razão, impõem-se iniciativas que promovam a reabilitação destes edifícios tanto para o nível construtivo, dotando-os de melhores níveis de isolamento térmico, como a nível de instalações, melhorando a eficiência do fornecimento de energia. Este trabalho constituiu uma abordagem possível a este tema, não só a nível metodológico, como também ao nível da proposta de soluções.





## Referências Bibliográficas

- [1] PORDATA, “Consumo de Energia Primária Total,” 2014. [Online]. Available: <http://www.pordata.pt/Portugal/Consumo+de+energia+primaria+total+e+por+tipo+de+fonte+de+energia-1130>.
- [2] B. University, “Total Final Energy Use,” 2013. [Online]. Available: <http://www.bu.edu/today/2013/the-climate-crisis-breaking-the-fossil-fuel-habit/>.
- [3] European Commission, “EU energy and Transport in Figures - Statistical Pocket Book 2010,” 2010.
- [4] PORDATA, “Edifícios segundo os Censos: total e por época de construção,” 2012. [Online]. Available: <http://www.pordata.pt/Portugal/Edificios+segundo+os+Censos+total+e+por+epoca+de+construcao-93>.
- [5] N. Madeira, “Metodologia do PDM.” 2011.
- [6] T.-G. António Mascarenhas, “A Engenharia Militar Portuguesa,” no. 3.
- [7] N. Iii, R. De Pena, V. Flor, and S. Vouga, *Despacho nº 15793-F/2013*, no. 26. 2013, pp. 26–31.
- [8] TheEngineeringToolBox, “Carbon Dioxide emission from person depends on activity,” 2014. [Online]. Available: [http://www.engineeringtoolbox.com/co2-persons-d\\_691.html](http://www.engineeringtoolbox.com/co2-persons-d_691.html).
- [9] *Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios*. 2006, pp. 2416–2468.
- [10] *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços*, no. 2. 2013, pp. 2–9.
- [11] *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*. 2006, pp. 2468–2513.
- [12] *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços*, no. 40. 2013, pp. 40–73.
- [13] “Gerador de preços para construção civil. Portugal. CYPE Ingenieros, S.A.” [Online]. Available: <http://www.geradordeprecos.info/>.
- [14] “European Association for External Thermal Insulation Composite Systems,” 2014. [Online]. Available: <http://www.ea-etics.eu/>.
- [15] Dow, “Isolamento térmico de pavimentos,” vol. 0. pp. 67–78.
- [16] EDP, “Tarifas Baixa Tensão Normal até 20,7kVA,” 2014. [Online]. Available: <http://www.edpsu.pt/pt/particulares/tarifasehorarios/BTN/Pages/TarifasBTNate20.7kVA.aspx>.
- [17] A. M. Rodrigues, A. C. da Piedade, and A. M. Braga, *Térmica de Edifícios*. 2009.
- [18] J. R. Cabrito, “Comportamento Térmico e Energético de Unidades CANIFA e Propostas de Melhoria: Caso de Estudo: Edifício de Comando,” Instituto Superior Técnico, 2014.